



**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS  
ORGÁNICAS Y AZUFRE ELEMENTAL SOBRE  
PROPIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS Y  
BIOLÓGICAS DE UN SUELO SÓDICO *TYPIC  
HAPLUSTEPTS* CON CULTIVO DE MAÍZ (*Zea  
mays*) EN EL COPEY-CESAR**

**RICHAR MANUEL SIMANCA FONTALVO**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá D.C., Colombia

2017



# **EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ORGÁNICAS Y AZUFRE ELEMENTAL SOBRE PROPIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS Y BIOLÓGICAS DE UN SUELO SODICO *TYPIC* *HAPLUSTEPTS* CON CULTIVO DE MAIZ (*Zea* *mayz*) EN EL COPEY-CESAR**

**RICHAR MANUEL SIMANCA FONTALVO**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ciencias Agrarias**

Director:

Ph.D Jairo Leonardo Cuervo Andrade

Línea de investigación:

Manejo de Suelos y Aguas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá D.C., Colombia

2017



*A mi Familia*



## Agradecimientos

De antemano gracias a Dios porque de Él y para Él es toda honra y toda gloria y toda alabanza que del hombre surja.

A mis padres, Juana Fontalvo y Pablo Simanca, hermanos y mi compañera Eira Dominguez que a pesar de las adversidades de la vida por las que hemos pasado, siempre me brindaron su apoyo y hombro. Además de enseñarme que la nobleza y el sacrificio son las formulas del éxito. De ellos y para ellos esta obra.

A la empresa Fertiservicios S.A.S y sus trabajadores por su colaboración y ayuda en el montaje y materiales para el establecimiento del ensayo en la finca Mojabobos, además de su patrocinio para la realización de mis estudios de postgrados.

A COLCIENCIAS entidad financiadora del programa “*Jóvenes investigadores e innovadores 2015*” por financiar el presente proyecto de tesis maestría.

Al profesor Ph.D Jairo Leonardo Cuervo Andrade profesor de la facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, por su apoyo, confianza y dirección durante el desarrollo de esta tesis de maestría.





## Resumen

Se determinó el efecto de la aplicación de un abono verde, vermicompost y azufre mineral sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas de un suelo sódico *Tipyc Haplustepts* bajo cultivo de *Z. mays*. Se estableció un ensayo en campo de 9 tratamientos con tres repeticiones, agrupados en un diseño de bloques completos al azar, para un total de 27 parcelas de 10m<sup>2</sup> que consistían de aplicaciones únicas o mezcladas de materia orgánica de *Prosopis juliflora* o vermicompost y azufre elemental, correspondiente al 100% de la cantidad requerida de azufre elemental para disminuir el porcentaje de saturación de sodio intercambiable (PSI) hasta 5%. Se determinaron las propiedades biológicas biomasa microbiana (BMC) a través del método de fumigación-incubación, respiración microbiana (RMS) por la técnica de jarra cerrada, la actividad de las enzimas fosfatasas (alcalina y ácida), proteasa y actividad hidrolítica del suelo mediante la hidrólisis del diacetato de fluoresceína (FDA); así como algunas propiedades fisicoquímicas del suelo asociadas a sodicidad. El efecto sobre las propiedades biológicas del suelo dependió del tipo de insumo utilizado y su composición, dada las diferencias que se encontraron entre tratamientos. De forma en general la aplicación de enmiendas orgánicas afecta positivamente la RMS y la FDA a largo tiempo; mientras que la aplicación de azufre elemental aumenta la BMC pero tiende con el tiempo a disminuir la RMS y la actividad de las enzimas medidas, al menos que este sea mezclado con ambas enmiendas orgánicas. De otro lado las variables químicas también mostraron tendencias a variar dependiendo del tratamiento, aunque ninguna de las variables físicas y el contenido de Carbono orgánico presentaron diferencias significativas con respecto al control. Los resultados sugieren que aplicaciones de enmiendas verdes mezcladas con azufre elemental como agente acidulante, afectan de forma positiva las propiedades biológicas de suelos sódicos y aquellas químicas relacionadas con la sodicidad del suelo, pues se estimula la BMC y se reduce la actividad hidrolíticas sobre la materia orgánica del suelo, lo que contribuiría al establecimiento de plantas y microorganismos del suelo.

**Palabras clave:** Actividad y biomasa microbiana, enmiendas minerales, enmiendas orgánicas, enzimas, rizosfera

## Abstract

It was determined the effect of applying green manures, vermicompost and mineral sulfur on the physicochemical and biological properties of a *Typic Haplustepts* sodic soil under *Z. mays* cultivation. A field trial of 9 treatments with three replications, grouped in a randomized complete block design, was established, for a total 27 plots of 10 m<sup>2</sup> plots which consisted of single or mixed applications of organic matter from green amendment of *Prosopis juliflora* or vermicompost and elemental sulfur, corresponding to 100% of the amount of elemental sulfur required to decrease the PSI by down to 5%. The biological properties determined were microbial biomass (BMC) through the fumigation-incubation method, microbial respiration (RMS) by the closed jar technique, the activity of the enzymes phosphatases (alkaline and acid), protease and hydrolysis of fluorescein diacetate (FDA); as well as some physicochemical properties of the soil associated with sodicity. The effect on the biological properties of the soil depended on the type of amendment used and its composition, given the differences found between treatments. In general, the application of organic amendments positively affects the RMS and the FDA in a long time; while the application of elemental sulfur increases the BMC but tends in time to decrease the RMS and the activity of the measured enzymes, unless it is mixed with both organic amendments. On the other hand the chemical variables also showed tendencies to vary depending on the treatment, although none of the physical variables and the content of Organic carbon presented significant differences with respect to the control. The results suggest that applications of green amendments mixed with elemental sulfur as acidifying agent , positively affect the biological properties of sodic soils and chemical properties related to soil sodicity, as BMC is stimulated and hydrolytic activity on soil organic matter is reduced, which would contribute to the establishment of soil plants and microorganisms .

**Keywords:** Activity and microbial biomass, mineral amendments, organic amendments, enzymes, rhizosphere

# Contenido

## Resumen IX

Lista de figuras.....	XIII
-----------------------	------

Lista de tablas .....	XVI
-----------------------	-----

Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVIII
---------------------------------------	-------

Introducción .....	1
--------------------	---

1. Objetivos.....	5
-------------------	---

1.1 Objetivo general.....	5
---------------------------	---

1.2 Objetivos específicos .....	5
---------------------------------	---

2. Marco teórico.....	7
-----------------------	---

2.1 Suelos afectados por sales .....	7
--------------------------------------	---

2.1.1 Enmiendas minerales usadas para el manejo de suelos afectados por sales	7
---	---

2.2 Abonos verdes.....	9
------------------------	---

2.3 Vermicompostaje .....	10
---------------------------	----

2.4 Enzimas del suelo.....	11
----------------------------	----

3. Materiales y métodos .....	15
-------------------------------	----

3.1 Localización .....	15
------------------------	----

3.2 Descripción del experimento.....	16
--------------------------------------	----

3.3 Establecimiento del ensayo .....	19
--------------------------------------	----

3.4 Muestreo y variables.....	20
-------------------------------	----

3.4.1 Parámetros fisicoquímicos .....	20
---------------------------------------	----

3.4.2 Parámetros biológicos.....	21
----------------------------------	----

3.4.3 Variables de desarrollo cultivo maíz .....	22
--	----

3.5 Análisis estadístico .....	22
--------------------------------	----

4. Resultados y discusión .....	25
---------------------------------	----

4.1 Efecto de enmiendas organicas y azufre elemental sobre las propiedades fisicoquimicas.....	25
--	----

4.2 Efecto de enmiendas organicas y azufre elemental sobre las propiedades biologicas .....	35
---	----

4.2.1 Biomasa y respiración microbiana.....	35
---	----

4.2.2 Enzimas del suelo .....	39
-------------------------------	----

4.2.2.1 Fosfatasa alcalina y acida .....	39
--	----

4.2.2.2	Proteasa .....	43
4.2.2.3	Actividad hidrolítica general .....	45
4.3	Efecto de enmiendas orgánicas y azufre elemental sobre las variables de desarrollo del cultivo maíz.....	47
4.4	Correlaciones entre las propiedades físicoquímicas y biológicas del suelo sódico y las variables de desarrollo del maíz .....	50
4.4.1	Propiedades físicoquímicas .....	50
4.4.2	Propiedades biológicas.....	51
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>53</b>
5.1	Conclusiones.....	53
5.2	Recomendaciones.....	53
<b>Anexo A.</b>	<b>Descripción del suelo sódico .....</b>	<b>57</b>
<b>Anexo B.</b>	<b>Resultados del análisis granulométrico del suelo Typic Haplustepts....</b>	<b>61</b>
<b>Anexo C.</b>	<b>Resultados del análisis químico en pasta de saturación del suelo Typic Haplustepts .....</b>	<b>62</b>
<b>Anexo D.</b>	<b>Curvas de calibración de las actividades enzimáticas evaluadas en suelo .....</b>	<b>63</b>
<b>Anexo E.</b>	<b>Curvas de calibración de las actividades enzimáticas evaluadas en suelo .....</b>	<b>67</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>.....</b>	<b>70</b>

## Lista de figuras

- Figura 1:** Diseño de bloques completos al azar del ensayo establecido en el área de estudio correspondiente. ....17
- Figura 2:** pH de un suelo sódico cultivado con *Zea mayz* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos .....28
- Figura 3:** Conductividad eléctrica (A), Calcio (B) y Magnesio (C) en solución de un suelo sódico cultivado con *Zea mayz* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....30
- Figura 4:** Sodio en solución de un suelo sódico cultivado con *Zea mayz* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....32
- Figura 5:** Sodio reactivo en solución (RAS) de un suelo sódico cultivado con *Zea mayz* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....33
- Figura 6:** Biomasa microbiana de un suelo sódico cultivado con *Zea mayz* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....37
- Figura 7:** Respiración microbiana-CO<sub>2</sub> de un suelo sódico cultivado con *Zea mayz* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....38
- Figura 8:** Fosfatasa alcalina de un suelo sódico cultivado con *Zea mayz* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....40
- Figura 9:** Fosfatasa ácida de un suelo sódico cultivado con *Zea mayz* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre

elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....	42
<b>Figura 10:</b> Actividad proteasa de un suelo sódico cultivado con <i>Zea mays</i> tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de <i>P. juliflora</i> y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....	45
<b>Figura 11:</b> Actividad hidrolítica general (FDA) de un suelo sódico cultivado con <i>Zea mays</i> tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de <i>P. juliflora</i> y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....	47
<b>Figura 12:</b> Variables de desarrollo del cultivo de maíz de un suelo sódico tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de <i>P. juliflora</i> y vermicompost) y azufre elemental. A) Longitud plantas B) Peso plantas C) Diámetro tallo plantas. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....	49
Figura 13: Perfil del suelo Typic Haplustepts.....	57
Figura 14: Curva de calibración fosfatasa alcalina.....	60
Figura 15: Curva de calibración fosfatasa ácida.....	61
Figura 16: Curva de calibración proteasa.....	62
Figura 17: Curva de calibración FDA.....	63



## Lista de tablas

<b>Tabla 1:</b> Propiedades fisicoquímicas del suelo sódico ensayado.....	16
<b>Tabla 2:</b> Diseño de bloques completos al azar del ensayo establecido en el área de estudio correspondiente.....	14
<b>Tabla 3:</b> Análisis fisicoquímico de las enmiendas utilizadas en el ensayo.....	19
<b>Tabla 4:</b> Efecto sobre las variables químicas pH, Conductividad eléctrica (CE), Calcio y Magnesio soluble de un suelo sódico cultivado con maíz debido al empleo de enmiendas orgánicas y azufre elemental.....	27
<b>Tabla 5:</b> Sodio en solución y RAS de un suelo sódico cultivado con <i>Zea mays</i> tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de <i>P. juliflora</i> y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....	31
<b>Tabla 6:</b> Carbono orgánico, Capacidad de intercambio catiónico efectiva, Porcentaje de saturación de sodio, Diametro geométrico medio y Diametro promedio y estabilidad estructural de un suelo sódico cultivado con <i>Zea mays</i> tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de <i>P. juliflora</i> y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....	34
<b>Tabla 7:</b> Biomasa microbiana (BMC) y Respiración microbiana del suelo (RMS) de un suelo sódico cultivado con <i>Zea mays</i> tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de <i>P. juliflora</i> y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....	36
<b>Tabla 8:</b> Fosfatasa alcalina (A) y acida (B) de un suelo sódico cultivado con <i>Zea mays</i> tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de <i>P. juliflora</i> y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....	41
<b>Tabla 9:</b> Actividad proteasa de un suelo sódico cultivado con <i>Zea mays</i> tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de <i>P. juliflora</i> y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....	44
<b>Tabla 10:</b> Actividad hidrolítica general (FDA) de un suelo sódico cultivado con <i>Zea mays</i> tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de <i>P. juliflora</i> y vermicompost)	



y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....	46
<b>Tabla 11:</b> Variables de desarrollo del cultivo de maiz de un suelo sódico tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de <i>P. juliflora</i> y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.....	48
<b>Tabla 12:</b> Resultados del análisis granulométrico del suelo Typic Haplustepts.....	58
<b>Tabla 13:</b> Resultados del análisis químico en pasta de saturación del suelo Typic Haplustepts.....	59

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
<i>A</i>	Área	m <sup>2</sup>
<i>V</i>	Volumen	<i>L</i>

### Abreviaturas

#### Abreviatura Término

AE	Estabilidad estructural
BMC	Biomasa microbiana del suelo
C	Carbono
Ca	Calcio
CE	Conductividad eléctrica
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
CICE	Capacidad de intercambio catiónico efectiva
Cm	Centímetro
CO	Carbono orgánico
DGM	Diámetro geométrico medio
DPM	Diámetro promedio medio
FDA	Hidrolisis del diacetato de fluoresceína
g	Gramo

**Abreviatura    Término**

---

ha	Hectárea
K	Potasio
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
mm	Milímetros
N	Nitrógeno
Na	Sodio
P	Fosforo
PSI	Porcentaje de sodio intercambiable
RAS	Relación de absorción de sodio
RMS	Respiración microbiana del suelo
t	Tonelada



# Introducción

La salinización de los suelos es actualmente uno de los principales problemas de la agricultura en regiones áridas y semiáridas del planeta, debido a la acumulación de sales minerales en la superficie y/o el uso de actividades inadecuadas, relacionadas al manejo de suelos y riego (Amini *et al.*, 2015) lo cual altera las condiciones fisicoquímicas e hidráulicas del suelo, reflejado en deficiencias nutricionales y toxicidades por iones como el  $\text{Na}^+$ , acompañado además de pérdida de la estabilidad estructural, aumento del pH y conductividad eléctrica del suelo (Amini *et al.*, 2015); lo cual conlleva que en estos suelos la vegetación sea escasa o nula (Amini *et al.*, 2015; Chaganti *et al.* 2015). Estimándose que cerca de  $9,55 \times 10^6$  ha de los suelos alrededor del planeta se encuentra afectados por algún grado de salinidad y sodicidad (Singh *et al.*, 2013a), donde el estimado para la región caribe colombiana es 3'506.033 ha (Pulido, 2000).

Los suelos sódicos se caracterizan por presentar propiedades hidráulicas pobres, potenciales osmóticos altos, dispersión de las arcillas, altas concentraciones de bicarbonatos y carbonatos, deficiencias de N, P, K y micronutrientes, además de toxicidad por aniones y  $\text{Na}^+$ , las anteriores características causan que la productividad agrícola en regiones con porcentajes considerables de este tipo de suelos sea baja, lo que causa aumento de las necesidades básicas insatisfechas en los asentamientos humanos en los que se encuentran, donde generalmente en Asia, gran parte de estos suelos pertenecen a pequeños agricultores (Qadir *et al.*, 2006).

Dada la creciente demanda por fibras y combustibles en el mundo, varios países han venido desarrollando planes de rehabilitación y recuperación de suelos sódicos, a través del uso de enmiendas orgánicas y químicas, de bajo costo y disponibles localmente, junto con el cultivo de plantas fitoremediadoras (Clark *et al.*, 2007a; Singh *et al.*, 2013b; Singh *et al.*, 2013c; Singh *et al.*, 2014; Srivastava *et al.*, 2014) con el fin de disminuir los parámetros PSI, pH y RAS a niveles adecuados para la agricultura (Singh *et al.*, 2013a). A pesar de lo anterior para la región caribe colombiana el manejo y reclamación de este

tipo de suelos actualmente se basa en el desplazamiento y posterior lavado del Sodio intercambiable a través del uso de altas cantidades de agua y enmiendas minerales, lo cual dada la escases de agua apta para uso agrícola en la región, los altos costos actuales del yeso, por su uso intensivo en la industria, y reducción de subsidios gubernamentales a los cultivadores hacen que la recuperación de dichos suelos sea poco rentable o insostenible. Por lo que se hace necesario determinar el efecto de enmiendas orgánicas y/o minerales, de bajo costo y disponibles localmente, sobre suelos degradados por sodio cultivados con plantas con potencial fitomejorador.

En este contexto el azufre elemental ( $S^0$ ) se ha utilizado como una enmienda química adecuada para el manejo de suelos sódicos o salino/sódicos en la región Caribe, reemplazando el yeso, debido a su alta disponibilidad y bajo costo gracias a la industria petroquímica desarrollada dentro de la región donde es producido como co-producto del procesamiento del petróleo crudo. El efecto del  $S^0$  en el manejo de suelos sódicos se debe a que al oxidarse se transforma en ácido sulfúrico que contribuye a disminuir el pH del suelo y disolver sales de bicarbonatos y carbonatos de Calcio, aumentando la concentración de  $Ca^{+2}$  disponible para desplazar los iones  $Na^+$ . Lo cual provoca efectos similares a aplicaciones de yeso al aumentar la productividad de los cultivos y bajar la CE, PSI y RAS (Stamford *et al.*, 2002; García de la Fuente *et al.*, 2007). Entre las enmiendas orgánicas el vermicompost, es una enmienda orgánica producto de la transformación de residuos orgánicos, por la acción conjunta de lombrices de tierra y microorganismos, produciéndose de esta forma una enmienda orgánica con alta carga microbiana y carbono orgánico oxidable que puede mejorar ciertas propiedades de suelos degradados como pH, CE, y PSI (Mogollón *et al.*, 2011), además se ha demostrado que el vermicompost mezclado con enmiendas minerales o químicas, puede reducir las cantidades requeridas de estas últimas, lográndose un mayor efecto sobre las propiedades biológicas y fisicoquímicas de suelos afectados por sales (Hernandez-Araujo *et al.*, 2013; Singh & Rai, 1973).

De igual categoría que el Vermicompost, la enmienda verde producida a partir de *Prosopis juliflora*, planta leguminosa nativa de América la cual generalmente crece en zonas áridas de la región Caribe, ha sido utilizada en la rehabilitación de suelos sódicos (Singh 2013) encontrándose que la materia vegetal de este árbol contribuyen al mejoramiento de la fertilidad de los suelos sódicos además que estimulan el crecimiento y actividad de los microorganismos (Vallejo *et al.* 2012)

Generalmente el objetivo de los planes de remediación de los suelos sódicos se basa en la disminución del pH, PSI y RAS a niveles adecuados para el establecimiento de vegetación (Singh *et al.*, 2013a) dejando a un lado la medición de parámetros biológicos como la biomasa y actividad microbiana, los cuales han demostrado estar íntimamente ligados a la calidad de los suelos debido a su papel en la degradación de la materia orgánica y los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes (Verchot & Borelli, 2005; Singh, 2016), además que presentan una mayor sensibilidad a los cambios ambientales y del uso del suelo. Por ejemplo las enzimas fosfatasa alcalina y acida (mineralización del fósforo), proteasa (mineralización del nitrógeno), esterases y lipasas (hidrolisis de ésteres y lípidos) que juegan un papel en los ciclos del C, P y N, han demostrado ser sensibles a los cambios de pH y conductividad eléctrica del suelo (Caldwell, 2005).

A pesar de lo anterior, existe poca información referente al efecto de enmiendas orgánicas o minerales sobre las propiedades biológicas de los suelos sódicos, debido tal vez a la desconfianza sobre la estabilidad de las enzimas extracelulares (Singh *et al.*, 2013a; Dose *et al.*, 2015) y al reporte de estudios con resultados contradictorios referentes al efecto de la salinidad y sodicidad sobre la biomasa y actividad microbiana (Celis *et al.*, 2013). Aun así algunos autores sugieren seguir realizando estudios sobre la enzimología de suelos sódicos con el fin de entender la ecología del sistema suelo (Singh, 2016).

Debido al anterior contexto, la presente investigación tuvo como objetivo determinar el efecto de la aplicación de un abono verde, vermicompost y azufre mineral sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas de un suelo sódico tipo Haplustepts bajo el cultivo de *Zea mays*. Esto teniendo en cuenta que en la región caribe colombiana se encuentra el 23% de las tierras cultivadas en Colombia donde los cultivos de maíz tradicional y yuca ocupan las mayores áreas cultivadas con un 30,5% (Aguilera *et al.* 2013), debido que el cultivo de maíz puede ser utilizado para la alimentación humana y animal, incluso hace parte de la gastronomía tradicional local, por lo que es cultivado comúnmente por pequeños productores que disponen de un pobre desarrollo agrícola y de innovación (Garrido-Rubiano *et al.* 2017) lo que provoca que la productividad, rendimiento y rentabilidad del cultivo sea baja. De otro lado el Maíz es un cultivo que crece en un amplio espectro de suelos y condiciones climáticas, de sensibilidad moderada al estrés salino, por lo que su productividad y actividad rizosférica es sensible a la concentración de  $\text{Na}^+$  (Farooq *et al.*, 2015; Inal & Gunes, 2008), lo cual lo convierte

en un cultivo potencial para la determinación del efecto de enmiendas sobre las propiedades biológicas y fisicoquímicas de suelos sódicos en la regio caribe colombiana.



# 1. Objetivos

## 1.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y azufre elemental sobre algunas propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo sódico *Typic haplustepts* bajo el cultivo de *Zea mays* L.

## 1.2 Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la aplicación de abono verde, vermicompost y azufre elemental sobre algunas propiedades físicas (Estabilidad estructural) y químicas (Bases solubles, Capacidad de Intercambio Catiónico Efectivo, Carbono Orgánico Oxidable, CE, pH, PSI, RAS) de un suelo sódico *Typic haplustepts* bajo el cultivo de *Z. mays*.
- Determinar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y azufre elemental sobre la actividad enzimática de la fosfatasa alcalina y acida, proteasa y FDA de un suelo sódico *Typic haplustepts* bajo el cultivo de *Z. mays*.
- Determinar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y azufre elemental sobre la respiración microbiana y biomasa microbiana de un suelo sódico *Typic haplustepts* bajo el cultivo de *Z. mays*.
- Determinar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y azufre elemental sobre las variables de desarrollo (diámetro tallo, longitud total, y peso fresco) de plantas de maíz cultivadas en un suelo sódico *Typic haplustepts*.



## **2.Marco teórico**

### **2.1 Suelos afectados por sales**

La salinidad del suelo es uno de los principales problemas alrededor del mundo debido a que afecta la capacidad productiva de los cultivos, en especial en aquellas zonas áridas o semiáridas en donde la evapotranspiración es mayor que la precipitación, razón por la cual las sales solubles del suelo tienden a concentrarse en el perfil (Sánchez *et al.*, 2002; Mahmoodabadi, *et al.*, 2012;). En Colombia la mayor parte de los suelos afectados por sales se encuentran ubicados en la región Caribe, debido a las características geológicas y edafoclimáticas que presentan (Malagon,1995; Pulido, 2000).

Los efectos de las sales en el suelo son muy variados, aunque generalmente inciden sobre el suministro de agua para las plantas, reduciendo generalmente su absorción por la alta presión osmótica que se genera en los suelos con alta concentración de sales solubles, e indirectamente cuando el ion sodio produce deterioro biológico, físico y químico del suelo, (Zérega & Adams, 1991; Sánchez *et al.*, 2002; Mahmoodabadi *et al.*, 2012). Debido a lo anterior el manejo y remediación de este tipo de suelos exige el uso de enmiendas minerales como el yeso o el azufre (Mahmoodabadi *et al.*, 2012), o cualquier material que permita un reemplazo entre iones intercambiables para un posterior lavado con agua (Sánchez *et al.*, 2002), razón por la cual se considera generalmente como antieconómico.

#### **2.1.1 Enmiendas minerales usadas para el manejo de suelos afectados por sales**

El manejo de suelos afectados con sales a través del uso de enmiendas minerales es una tecnología ampliamente aplicada y establecidas alrededor del mundo (Ali, 2011). El uso de enmiendas químicas en este tipo de suelo se fundamentan en dos mecanismos de acción, siendo algunas enmiendas (como el yeso) fuentes de Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) que

reemplazan el exceso de  $\text{Na}^+$  de los sitios de intercambio cationico (Qadir & Oster, 2002; Ali, 2011; Gharaibeh *et al.*, 2011); por otro lado otro grupo de enmiendas (como el ácido sulfúrico y azufre mineral) se utilizan como fuentes de ácidos que contribuyen a la disolución de la calcita de suelos calcáreos salinos (Qadir & Oster, 2002; García de la Fuente *et al.*, 2007; Ali, 2011).

El uso de yeso como enmienda química para el manejo de suelos afectados por sales ha sido ampliamente documentado, destacan los trabajos realizados en el valle de California por Kelley y colaboradores (Qadir & Oster, 2002) en el que aplicaron yeso e inundaron los suelos anualmente, y sembraron de forma alternativa varios cultivos resistentes a la salinidad con el fin de fitoremediar el suelo, obteniendo resultados a corto y largo plazo destacándose la reducción de la conductividad eléctrica y pH del suelo además del aumento progresivo de la productividad de los cultivos.

Si bien varios estudios han obtenido resultados similares a los obtenidos por Kelley y colaboradores en términos de productividad de los cultivos y parámetros fisicoquímicos (Qadir *et al.*, 1996; Ilyas *et al.*, 1997; Qadir & Oster, 2002; Stamford *et al.*, 2002; Gharaibeh *et al.*, 2011; Rasouli *et al.*, 2013; Yazdanpanah & Mahmoodabadi, 2013) es de destacar que se ha observado también que las aplicaciones de yeso no solamente tienen efecto sobre las propiedades químicas del suelo, sino que también alteran propiedades físicas como la estabilidad estructural (Rasouli *et al.*, 2013); y propiedades biológicas, como abundancia y actividad de microorganismos (Qadir & Oster, 2002; Yazdanpanah & Mahmoodabadi, 2013), razón por la cual el yeso ha sido utilizado en conjunto para planes de fitoremediación de suelos afectados por sales (Qadir *et al.*, 1996; Ilyas *et al.*, 1997; Stamford *et al.*, 2002; Velarde *et al.*, 2005; Gharaibeh *et al.*, 2011).

Dada la presencia de altas concentraciones de Calcio, en forma de carbonatos, en algunos tipos de suelos afectados por sales, el manejo por medio de aplicaciones de Yeso muchas veces no es adecuado, razón por la cual se utilizan enmiendas químicas que promuevan la disolución de la calcita para la liberación del Calcio retenido (Qadir & Oster, 2002; García de la Fuente *et al.*, 2007; Ali, 2011). El azufre elemental ( $\text{S}^0$ ) debido a sus costos y disponibilidad es una de las enmiendas químicas mayormente utilizadas debido a que en el proceso de oxidación biológica del  $\text{S}^0$ , se produce ácido sulfúrico y disminución del pH lo cual contribuye (Freney, 1967; García de la Fuente *et al.*, 2007) a la liberación de  $\text{Ca}^{+2}$  de la calcita, que pueden desplazar los iones  $\text{Na}^+$  (Modaihsh *et al.*,

1989; Stamford *et al.*, 2002; García de la Fuente *et al.*, 2007). El carácter netamente biológico del proceso de oxidación del S° este depende de ciertas condiciones idóneas, tales como humedad, concentración de microorganismos, disponibilidad de nutrientes e incluso tamaño del grano y concentración aplicada (Freney, 1967; Boswell & Friesen, 1993; Jaggi *et al.*, 1999; Velarde *et al.*, 2005; García de la Fuente *et al.*, 2007), por lo tanto a mayor acidificación y producción de ácido sulfúrico la tasa de oxidación del S° disminuye, y su efectividad puede variar. Debido a lo anterior se han estudiado mezclas de azufre previamente inoculadas con microorganismos, generalmente del genero *Thiobacillus* (Stamford *et al.*, 2002), con el fin de aumentar la tasa de oxidación biológica del suelo demostrando que la inoculación con microorganismos o mezclas con compost aumentan la tasa de oxidación biológica (Wainwright *et al.*, 1986; García de la Fuente *et al.*, 2007).

## 2.2 Abonos verdes

Un abono verde es el forraje de cualquier especie de planta, generalmente gramínea o leguminosa, que es cortado antes de floración e incorporado al suelo con el objetivo de mejorar las propiedades biológicas y fisicoquímicas del suelo (Ferrari & Wall, 2004; Tejada *et al.*, 2008; Ashraf *et al.*, 2010). El efecto de los abonos verdes sobre suelos afectados por sales se fundamenta en que al incorporar materia orgánica fresca, se proporciona en corto tiempo energía a los microorganismos del suelo. Esto permite un aumento en la actividad y biomasa microbiana, que tiene efectos sobre aumento de la concentración de materia orgánica en el suelo, favoreciendo la agregación y porosidad del suelo, disminución del pH, CE, disminución del RAS y PSI y por último aumento en la tasa de mineralización de los nutrientes por lo que la disponibilidad de nutrientes para los cultivos es mayor (Velarde *et al.*, 2005; Basavaraja *et al.*, 2007; Tejada *et al.*, 2008; Ashraf *et al.*, 2010).

Debido a la capacidad de las leguminosas de formar simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno, estas son las plantas preferidas para su uso como abonos verdes, ya que la incorporación de forraje de este tipo de plantas con una relación C/N baja entre 15-18 permite, además de mejorar las propiedades del suelo, incorporar concentraciones considerables de N al suelo, lo cual permite reducir costos en la fertilización (Ferrari & Wall, 2004; Ashraf *et al.*, 2010). Existen dos grupos las leguminosas utilizadas como abonos verdes dependiendo de sus hábitos, se encuentran las arvenses (Ferrari & Wall,

2004; Tejada *et al.*, 2008), plantas rastreras, las cuales desarrollan gran cantidad de biomasa en lapsos cortos de tiempo que sirven como cobertura vegetal del suelo; y leñosas, las cuales son utilizadas preferiblemente en sistemas silvopastoriles (Rao & Gill, 1995; Ferrari & Wall, 2004; Ashraf *et al.*, 2010), y de las cuales se obtienen un mayor número de beneficios tales como madera, alimento animal e incluso humano (Basavaraja *et al.*, 2007), lo cual sumado a sus pocos requerimientos agronómicos plantea a este grupo como una alternativa tentadora en suelos en donde la calidad del agua y del suelo es baja.

En África y Asia las plantas del genero *Sesbania* spp. se destacan como leguminosas leñosas utilizadas comúnmente para el manejo de suelos afectados por sales (Rao & Gill, 1995; Ferrari & Wall, 2004; Ashraf *et al.*, 2010), debido a su rápido crecimiento y uso como combustible, además que algunas pueden ser utilizadas como alimento humano (Rao & Gill, 1995). En América del Sur existe el género *Prosopis* spp. como grupo de leguminosas leñosas que presenta adaptabilidad a condiciones de alta concentración de sales y conductividad eléctrica (Ferrari & Wall, 2004; Velarde *et al.*, 2005; Basavaraja *et al.*, 2007; Ashraf *et al.*, 2010) razón por la cual son utilizadas en programas de bioremediación o reclamación de este tipo de suelos (Velarde *et al.*, 2005; Basavaraja *et al.*, 2007). Las especies de este género han demostrado diversos beneficios en el manejo de suelos degradados por sales, ya que afectan positivamente las propiedades biológicas y fisicoquímicas de los suelos, además que presentan variedad de usos para las comunidades dado que puede ser utilizado como alimento animal y fuente de combustible y madera (Bhojvaid *et al.* 1996, Basavaraja *et al.*, 2007; Vallejo *et al.* 2012), incluso Singh *et al.* (2014) encontraron que el abono verde producido a partir de la hojarasca de *Prosopis* spp., contribuye a la acumulación de carbono orgánico en el suelo, y al aumento de la actividad microbiana y N en suelos con distintos grados de sódicidad.

## 2.3 Vermicompostaje

El Vermicompostaje es un proceso bio-oxidativo en donde lombrices de tierra detritívoras interactúan intensamente con microorganismos y otros macroorganismos los cuales afectan la descomposición y estabilización de la materia orgánica (Dominguez, 2011). Debido a que la materia orgánica atraviesa el tubo digestivo de la lombriz y es impregnada con mucosa secretada por las lombrices de tierra, el carbono disuelto en el

suelo aumenta relación C/N (Domínguez, 2011) y aumenta la microflora del suelo (Atiyeh *et al.*, 2000; Lazcano *et al.*, 2008; Pathma & Sakthivel, 2012).

En comparación con el compost de estiércol animal o vegetal, el vermicompost, posee una mayor riqueza y abundancia de microbiota (Lazcano *et al.*, 2008) parecida en estructura a la que se encuentra en el suelo (Domínguez, 2011) incluso posee microorganismos benéficos nativos (Pathma & Sakthivel, 2012) como fijadores de nitrógenos, hongos celulíticos, solubilizadores de fósforo, proteolíticos, promotores de crecimiento vegetal, entre otros (Lazcano *et al.*, 2008; Pathma & Sakthivel, 2012).

Además de poseer una microbiota nativa benéfica para los cultivos, el vermicompost posee ciertas propiedades fisicoquímicas que le brindan a la planta las condiciones edáficas para su establecimiento. Es así como esta enmienda posee una mayor retención de humedad, nutrientes solubles, ácidos húmicos y fulvicos (Arancon *et al.*, 2006; Befrozfar *et al.*, 2013) los cuales contribuyen a un mayor desarrollo de raíces y absorción de nutrientes, lo que favorece un aumento en la producción de cultivos y desarrollo de las plantas.

Debido a lo anterior el vermicompost ha sido propuesto como enmienda orgánica para la remediación de suelos salinos y sódicos, encontrándose que contribuye a mejorar las propiedades fisicoquímicas de los suelos afectados por sales al incrementar la concentración de cationes intercambiables, disminuir la concentración de Na y aumentar la actividad microbiana del suelo (Mogollon *et al.* 2011; Oo *et al.* 2013; Wu *et al.* 2013; Srivastava *et al.* 2014), debido a la presencia de ácidos húmicos y producción de dióxido de carbono (Ansari 2008), lo cual contribuye a que aumente el desarrollo de los cultivos

## 2.4 Enzimas del suelo

Las enzimas son catalizadores orgánicos que disminuyen la energía de activación de las reacciones químicas y permiten que estas se produzcan a temperaturas y presiones a las que normalmente no tendrían lugar (Giri *et al.*, 2011; Montejó *et al.*, 2012).

En el suelo las enzimas son producidas principalmente por bacterias, también son producidas por plantas y animales al secretarlas al suelo o debido a lisis celular. Lo anterior plantea que la medición de las enzimas en el suelo permitan aproximarse al entendimiento de los ciclos de los nutrientes y actividad microbiana de los suelos (Ceron

y Melgarejo, 2005) ya que los enzimas modulan las transformaciones bioquímicas de los nutrientes, mediando y catalizando procesos como la mineralización y ciclaje de nutrientes, descomposición y formación de la materia orgánica (Acosta-Martínez *et al.*, 2008; Giri *et al.*, 2011).

Dado el papel de las enzimas del suelo en la bioquímica de la descomposición de la materia orgánica y ciclaje de nutrientes en el suelo, las mediciones de las actividades enzimáticas del suelo son indicadores útiles de la actividad biológica del suelo (Burns *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2013a). Debido a la sensibilidad y rápida reacción de la actividad enzimática ha alteraciones de origen antropogénico y natural, éstas han sido utilizadas como indicadores en la calidad y salud del suelo (Acosta-Martínez & Tabatabai, 2000; Pajares *et al.*, 2011; Guangming *et al.*, 2017;). Además, teniendo en cuenta su origen netamente biológico, la actividad enzimática está íntimamente ligada al contenido de materia orgánica y a factores fisicoquímicos relacionados con el desarrollo de los microorganismos, por tal motivo en suelos degradados por sales donde la materia orgánica, actividad y biomasa microbiana permanecen generalmente bajas, la adición de enmiendas minerales u orgánicas, muestran respuesta en la actividad enzimática de algunas enzimas (Tejada *et al.*, 2008; Wong *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2013b; Singh, 2016; Guangming *et al.*, 2017). Considerando lo anterior, las enzimas pueden variar, así pues dependiendo del tipo de manejo o enmienda utilizada en el suelo, debido a la modificación de factores y propiedades del suelo tales como, concentración de sustratos, pH, conductividad eléctrica, humedad del suelo, tipo de cultivo establecido, disponibilidad de nutrientes, concentración de sales y sodio (Acosta-Martínez & Tabatabai, 2000; Pajares *et al.*, 2011; Burns *et al.*, 2013; Guangming *et al.*, 2017; Singh, 2016), propiedades tanto fisicoquímicas y biológicas, que presentan variación espacial y/o temporal (Burns *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2013), por lo que la actividad enzimática también puede presentar de igual manera variación espacio temporal, llegando a encontrarse valores de coeficiente de variación entre el 30% al 88% para las enzimas fosfatasas y ureasa, respectivamente, en distancias no mayores a 5 metros (Bonmati *et al.*, 1991).

En el suelo la disponibilidad del fósforo se encuentra principalmente mediado por procesos de mineralización e inmovilización de la fracción orgánica (Zhang *et al.* 2014; Eldor, 2015;), los cuales son mediados principalmente por las fosfatasas, enzimas que catalizan la hidrólisis de los enlaces monoestéricos entre carbono y fósforo lo cual libera



fosforo inorgánico (Nannipieri *et al.*, 2011; Gianfreda & Rao, 2014; Zhang *et al.*, 2014), siendo las fosfatasas alcalina y acida las dos formas activas de fosfatasa que son excretadas tanto por microorganismos como plantas, y las cuales se diferencian por el pH óptimo de medición, además que se ha demostrado que las plantas solamente pueden producir fosfatasas acidas mientras que los microorganismos pueden producir ambas fosfatasas (Spohn & Kuzyakov, 2013).

Teniendo en cuenta el papel de la fosfatasa alcalina en la mineralización del fosforo y que su producción generalmente ocurre como respuesta a bajas concentraciones de fosforo disponible (Lemanowicz, 2011; DeForest *et al.*, 2012), el aumento de la concentración de fosforo soluble o disminución del pH disminuye su actividad debido, por la inhibición competitiva de las fosfatasas por los iones fosfatos o por retroalimentación negativa de los iones fosfatos sobre los genes PHO de los microorganismos (Sinsabaugh *et al.*, 1993; Criquet *et al.*, 2007; Nannipieri *et al.*, 2011).

En cuanto la actividad de la fosfatasa acida del suelo, la evaluación de esta se realiza al igual que la fosfatasa alcalina por medio de la determinación del p-nitrofenol liberado después de la incubación del suelo con p-nitrofenilfosfato, con la diferencia de que el ensayo para la fosfatasa acida se realiza a pH de 6,5 y para la alcalina pH de 11 (Alef & Nannipieri, 1995). Por otra parte la fosfatasa acida también se diferencia de la alcalina, porque la acida puede ser producida tanto por plantas como por microorganismos (Kra & Green, 2000; Spohn & Kuzyakov, 2013).

Aplicaciones de enmiendas orgánicas, nitrógeno y fertilizantes químicos han mostrado aumentar la actividad de la fosfato acida, contrario a lo que sucede en la fosfatasa alcalina, debido al aumento en conjunto de la disponibilidad de fosforo y nitrógeno además de la capacidad de las plantas y ciertos grupos de microorganismos de solamente producir fosfatasa acida (Saha *et al.*, 2008; Nannipieri *et al.*, 2011; Spohn & Kuzyakov, 2013; Gianfreda, 2015)

Las proteasas son enzimas que juegan un papel importante en el ciclo del nitrógeno debido a que catalizan la hidrólisis de los enlaces peptídicos C–N de las cadenas polipeptídicas (Vranova *et al.*, 2013). Es de mencionar además que la medición de la actividad de la proteasas en el suelo, es más bien una estimación de la actividad potencial bajo condiciones de pH y temperaturas ideales usando un sustrato sintético

generalmente caseinato de sodio (Vranova et al., 2013) por lo que la actividad puede variar dependiendo del sustrato y pH utilizado (Ladd & Butler, 1972).

Entre las propiedades fisicoquímicas que pueden afectar la actividad proteasa, la concentración de N, C, Ca, pH, humedad del suelo y conductividad eléctrica (Ladd & Butler, 1970; Ellaiah *et al.*, 2002; Geisseler & Horwath, 2009; Siddikee, *et al.*, 2011; Vranova *et al.*, 2013; Singh, 2016;) son las más reportadas, por lo que de igual manera la fenología del cultivo, tipo de cultivo, manejo del suelo y tipo de enmienda utilizada también pueden influir sobre la actividad proteolítica del suelo (Tejada *et al.*, 2006; Chang *et al.*, 2007; Geisseler & Horwath, 2009; Mukhopadhyay & Joy, 2010; Song *et al.*, 2012; Vranova *et al.*, 2013).

## 3. Materiales y métodos

### 3.1 Localización

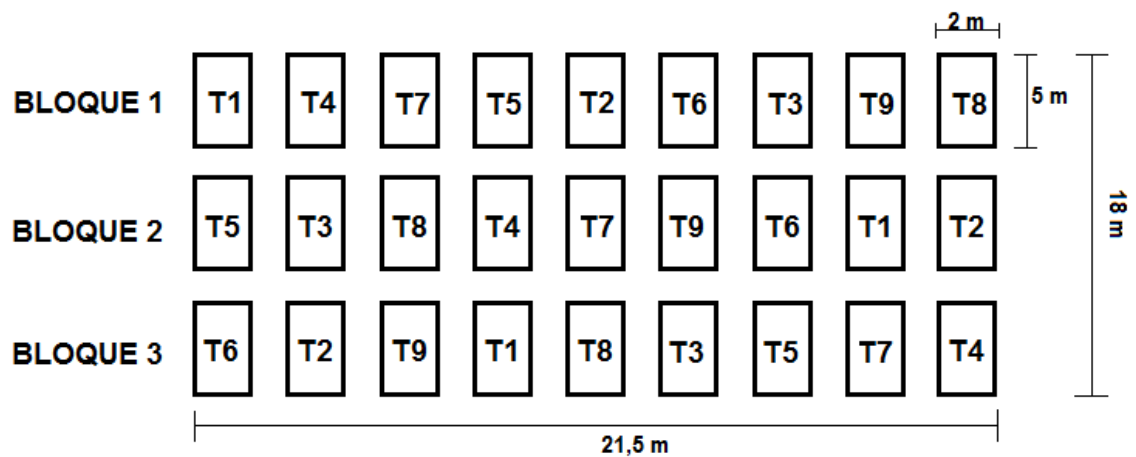
La investigación se desarrolló en la finca Mojabobos ubicada en el municipio de El Copey-Cesar (10°6'3.91"N; 74°0'17.67"O). El clima del lugar presenta temperatura media de 27,8°C, tasa de evaporación de 4,66 mm.día<sup>-1</sup> y precipitación promedio anual de 1030 mm. Al comparar y analizar las descripciones del suelo obtenidas por medio de una calicata y teniendo en cuenta las claves taxonómicas para la taxonomía de suelos USDA, el suelo de estudio se clasifica dentro del orden Inceptisol y taxonómicamente como *Typic Haplustepts* (IGAC, 1984; USDA, 2010) familia franco fina/arenosa, superactiva e isohipertermica. Este presenta un relieve plano con pendientes entre el 0 y 1%, de longitud larga y forma rectilínea. Entre las principales limitantes agronómicas para su uso se identificó bajo porcentaje de carbono orgánico, pH alcalino y PSI>15, características que corresponden a suelos potencialmente sódicos (USDA, 1954). Actualmente el área se ha venido utilizado desde >20 años como potrero para ganadería sembrado con pasto estrella (*Cynodon* sp.) Las características fisicoquímicas del suelo se encuentran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Propiedades fisicoquímicas del suelo sódico ensayado.

Parámetro	Estrato		
	0-32 cm	32-75	75-120
<b>pH</b>	7,9	9,2	9,6
<b>Conductividad eléctrica</b>	2,357	2,824	2,813
<b>Arcilla (%)</b>	19,3	23,3	27,4
<b>Arena (%)</b>	48,3	52,4	40,1
<b>Limo (%)</b>	32,4	24,3	32,5
<b>Textura</b>	Franco	Franco arcillo arenosa	Franco arcilloso
<b>Carbono orgánico %</b>	0,72	0,13	0,05
<b>CIC</b>	10,3	9	11,2
<b>Na (Cmol+/Kg)</b>	2,3	9	15,2
<b>Na solución (mmol+/L)</b>	15,6	26,2	24,9
<b>PSI</b>	17,09	88,4	96,7
<b>RAS</b>	9,87	32,75	23,27

### 3.2 Descripción del experimento

El diseño experimental utilizado fue el de bloques completos al azar, el cual conto con tres bloques en los que se distribuyeron los 9 tratamientos (Fig. 1). El tamaño de cada parcela fue de 10 m<sup>2</sup>, con una separación entre tratamientos de 0,5 m y entre bloques de 1,5 m, para un área total estimada de 387 m<sup>2</sup> y 270 m<sup>2</sup> de área útil. Previo a la aplicación de los tratamientos para toda el área donde se estableció el ensayo se preparó el suelo mediante el paso de un cincel rígido que permitiera romper la compactación del suelo y posteriormente se le aplico riego.



**Figura 1.** Diseño de bloques completos al azar del ensayo establecido en el área de estudio correspondiente.

Los tratamientos a evaluar consistieron de aplicaciones únicas o mezcladas de dos enmiendas orgánicas y azufre elemental, que se caracterizan por ser de acceso para los agricultores de la región y son conocidos por ellos; y dos controles, un control manejado con los fertilizantes utilizados generalmente en la región para el cultivo de maíz; y otro control sin ningún tipo de fertilizante o enmienda (Tabla 2). Los tratamientos se clasificaron en tres categorías las cuales eran control, tratamientos sin aplicaciones de enmiendas; orgánicos, tratamientos con aplicaciones de enmiendas orgánicas sin S°; y azufre elemental, los cuales correspondían a los tratamientos con presencia de S°. Mientras que la variedad de semilla de maíz utilizada fue la ICA-V-109 las cuales fueron sembradas en surcos separados por 0,8 m entre si y una distancia entre plantas de 0,25

**Tabla 2.** Descripción de los tratamientos utilizados en el cultivo de maíz en suelo salino.

Tratamiento	Tipo de tratamiento	Característica
T1	Control	Control sin aplicación de enmiendas o fertilizantes
T2	Control	Control manejado solo con fertilización local
T3	Orgánico	Abono verde de <i>P. juliflora</i> (AVP)
T4	Azufre	Azufre elemental (S°)
T5	Orgánico	Vermicompost (VERM)
T6	Azufre	AVP + S°
T7	Orgánico	AVP + VERM
T8	Azufre	VERM + S°
T9	Azufre	AVP + VERM + S°

El T1 correspondió al control manejado sin fertilizantes y enmiendas; T2 fue control manejado con fertilización química según lo recomendado para el cultivo convencional de maíz en la región caribe según Guerrero *et al.* (1990) el cual sugiere fertilizar a una dosis de 75-50-50, para ello se utilizó Triple 15 y Sulfato de amonio como fertilizantes, los cuales se aplicaron en tres fracciones; la primera a los 5 días después de sembradas las plantas consistía del 33% de N y 75% de P y K. La segunda fertilización se efectuó a los 35 días después de sembradas las plantas se aplicó 33% N y el restante 25% de N. La última fertilización se realizó a los 35 días después de la siembra con el 34% de N. Los fertilizantes se aplicaron alrededor de las plantas.

Debido a que el presente trabajo se planteó como objetivo evaluar el efecto de enmiendas orgánicas y azufre elemental sobre un suelo sódico cultivado con maíz, el resto de los tratamientos (T3-T9) fueron fertilizados con las mismas fuentes y dosis que T2. De otro lado todas las enmiendas fueron aplicadas en una sola dosis 1 días antes de la siembra de las plantas de maíz. Así pues T3 consistía de la aplicación de 3 t/ha de materia orgánica en forma de abono verde obtenido a partir de plantas de *P. juliflora* (Tabla 3) que crecían en el área de estudio, para ello se podaron las hojas jóvenes de las plantas evitando la incorporación de troncos o ramas fuertemente lignificadas, posteriormente todo el material vegetal se picó con machete, peso y se extendió uniformemente sobre la superficie de la parcela y luego se incorporó con la ayuda de un rastrillo. El T4 era azufre elemental micronizado (Tabla 3) producido por Monomeros

Colombo Venezolanos en dosis de 1,4 t/ha, que corresponde al 100% de la cantidad requerida de S° para poder disminuir el PSI hasta in 5% a 30 cm de profundidad de acuerdo a lo planteado por USDA. T5 correspondía a la aplicación de 3 t/ha de materia orgánica en forma de VERM (Tabla 3), el cual es producido localmente a partir de raquis de palma de aceite. El T6 era mezcla de AVP y S°, en las cantidades descritas anteriormente, de igual forma T7 era AVP con VERM, T8 VERM mas S° y T9 AVP, VERM y S°.

**Tabla 3.** Análisis fisicoquímico de las enmiendas utilizadas en el ensayo.

Propiedad	Abono verde <i>P. juliflora</i>	Vermicompost	Azufre elemental
pH	NA	6,9	ND
N (%)	4,8	1,2	ND
P (%)	0,33	2,2	ND
K (%)	1,77	1,8	ND
Ca (%)	0,88	2,5	ND
Mg (%)	0,29	1,58	ND
C/N	ND	11,6	ND
S (%)	ND	0,1	97
Humedad (%)	52%	25%	1%

ND: No determinado

### 3.3 Establecimiento del ensayo

El ensayo se realizó en un ciclo de cultivo de 75 días, con la variedad de maíz ICA-V-109 sembrado en 3 surcos separados por 0,8 m entre si y una distancia entre plantas de 0,25 m para una densidad de siembra de 50.000 plantas/ha, empleada por los agricultores de la zona. Se sembro por el método de siembra directa a razón de tres semillas/sito (pregerminadas por un periodo de 48 horas). Las enmiendas aplicadas 15 días antes de realizar la siembra de plantas de maíz en cada bloque de ensayo correspondiente. Todos los tratamientos, a excepción de T1, fueron fertilizados de igual manera que T2 en tres

fases correspondientes a 5, 20 y 35 días después de siembra. Mientras que la humedad del suelo era ajustada a capacidad de campo cada dos días.

## **3.4 Muestreo y variables**

### **3.4.1 Parámetros fisicoquímicos**

Las propiedades fisicoquímicas del suelo se dividieron en dos categorías. La primera corresponde a medición de cationes solubles, CE y pH, a las cuales se les realizó 4 seguimientos en el tiempo correspondientes a los 15, 30, 50 y 75 días después de siembra. La segunda categoría corresponde a las propiedades carbón orgánico, CICE, estabilidad estructural y PSI, los cuales se les realizó un solo seguimiento correspondiente a los 75 días después de la siembra.

Para las evaluaciones se tomaron muestras compuestas de cada uno de los tratamientos de los tres bloques del ensayo, siendo en total 27 compuestas. El muestreo se realizó siguiendo un patrón de “W” y las sub-muestras de suelo se tomaron en los primeros 10 cm de profundidad del suelo, en la zona rizosférica concéntrica de radio de 15 cm, alrededor del tallo de las plantas de maíz. Para la muestra compuesta de cada parcela se tomaron cinco sub-muestras de 200 g aproximadamente las cuales fueron homogenizadas y secadas al aire, para posteriormente ser tamizadas y guardadas en bolsas de polietileno debidamente rotuladas.

Todas las muestras de suelo fueron enviadas al laboratorio de Aguas y suelos de la facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá. Las variables determinadas fueron el pH y la conductividad eléctrica por suspensión (pH) o extracto en un volumen de 1:5, carbón orgánico por el método de combustión húmeda Walkley-Black, mientras que la capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) y bases solubles se determinaron por el método de acetato de amonio pH 7. Por último la estabilidad estructural fue determinada por el método de tamizado en húmedo de Yoder.

Las variables físico-químicas evaluadas fueron seleccionadas teniendo en cuenta que éstas pueden ser influenciadas por la adición de enmiendas orgánicas y minerales (Basavaraja *et al.*, 2007; García de la Fuente *et al.*, 2007; Mogollón *et al.*, 2011; Oo *et al.* 2013; Singh *et al.*, 2013a; Singh *et al.* 2014), cambios que pueden ser inducidos por la aplicación de las enmiendas utilizadas en el presente ensayo.



### 3.4.2 Parámetros biológicos

Las variables biológicas se seleccionaron teniendo en cuenta su capacidad de respuesta frente a los cambios de los manejos del suelo, como lo son el empleo de enmiendas orgánicas y/o minerales (Wong *et al.*, 2009; Wong *et al.*, 2010; Nannipieri *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2012; Kuzyakov *et al.*, 2013; Vranova *et al.*, 2013; Gianfreda, 2015; Silva Carvalho *et al.*, 2015).

Estas evaluaciones se realizaron cuatro veces en el tiempo que duro el ensayo. El primer evento se hizo a los 15 días después de sembrado las plantas y los demás a los 30, 50 y 75 días. Para todos los eventos se utilizó la misma metodología de muestreo. Donde en cada una de las parcelas de los tres bloques se tomó una muestra compuesta, para un total de 27 muestras compuestas. Para el muestreo se utilizaron elementos desinfectados. Este se realizó siguiendo un patrón de “W” y las sub-muestras de suelo se tomaron en los primero 10 cm de profundidad del suelo, en la zona rizosferica concéntrica de radio de 15 cm, alrededor del tallo de la planta de maíz. Para la muestra compuesta de cada parcela se tomaron cinco sub-muestras de 20 g aproximadamente las cuales fueron homogenizadas y depositadas en bolsas plásticas estériles debidamente rotuladas. Todas las muestras compuestas fueron transportadas en refrigeración a 4 °C y almacenadas bajo las mismas condiciones antes de su procesamiento (Bloem, *et al.*, 2006).

Las variables biológicas medidas fueron las enzimas fosfatasa acida y alcalina (EC 3.1.3.2 y 3.1.3.1) que se determinaron por el método de Tabatabai & Bremmer (1969) y Eivazi & Tabatabai (1977) por determinación del p-nitrofenol liberado después de la incubación del suelo con *p*-nitrofenilfosfato por 1 hora a 37°C, donde extracción y coloreado con solución de hidróxido de sodio y determinado por fotometría a 400 nm. La enzima proteasa (EC 3.4.2.21-24) determinada por el método de Ladd & Butler (1972) por determinación de los aminoácidos liberados después de la incubación del suelo con caseína por 2 h a 50 °C en pH 8,1, luego se realiza precipitación de la caseína remanente con ácido tricloroacetico y se adiciona reactivo de Folin-Ciocalteu para formar complejo colorimétrico con las enzimas (Ladd & Butler, 1972). Por último la actividad enzimática por hidrólisis del diacetato de fluoresceína (FDA) se determinó por el método sugerido por Adam & Duncan (2001) por determinación colorimétrica de la fluoresceína

producida en la conversión enzimática del diacetato por diferentes clases de enzimas como lipasas, esterasas y proteasas.

El Carbono de la Biomasa Microbiana (BMC) se estimó mediante el método de fumigación-incubación propuesto por Joergensen. (Alef & Nannipieri, 1995) el cual consistió en la exposición de la muestra de suelo a una atmosfera de cloroformo libre de etanol y posterior inoculación con suelo no fumigado, siendo determinada la biomasa microbiana por la diferencia del CO<sub>2</sub> producido en las muestras fumigadas y las no fumigadas. Por último la respiración microbiana del suelo (RMS) se estimó mediante el método de jarra cerrada con solución de hidróxido de sodio 1N propuesto por Jäggi (Alef & Nannipieri, 1995) el cual consistió en la estimación del CO<sub>2</sub> desprendido de una muestra de suelo en una cámara cerrada el cual es atrapado en una solución de NaOH 1M que es titulada con HCl 0,5 N.

### **3.4.3 Variables de desarrollo cultivo maíz**

Solamente se realizó una evaluación para las variables de desarrollo de cultivo de maíz al final del experimento en el día 75. Las mediciones se desarrollaron en 9 plantas de maíz tomadas del surco central de cada una de las 27 parcelas. En total se evaluaron 243 plantas.

Para la determinación de la longitud total se midió la altura de las plantas con ayuda de una cinta métrica; diámetro del tallo, se midió a 5 cm del suelo con ayuda de un pie de rey; por ultimo para la medición del peso fresco total, se cortaron las plantas a 5 cm del suelo y se pesaron in situ.

Las variables de desarrollo se seleccionaron teniendo en cuenta que estas han sido reportadas de forma previa por diversos autores para este tipo de evaluación (Zafar *et al.*, 2015)

## **3.5 Análisis estadístico**

Las variables de respuesta se analizaron con el paquete estadístico SPSS. Previo al análisis estadístico fueron comprobados los supuestos de normalidad y homocedasticidad de varianzas para cada variable evaluada por medio de los tests de Shapiro – Wilk y Levene, respectivamente.

Para la determinación de la presencia de efectos significativos por parte de los tratamientos, en cada uno de los días del ensayo, sobre las propiedades biológicas, fisicoquímicas y variables de desarrollo, se llevó a cabo por medio de un análisis de ANOVA y pruebas de comparación de medias (HSD Tukey -  $p \leq 0,05$ ). Lo anterior empleando el modelo de bloques completos al azar.

Para el establecimiento de correlaciones entre las variables evaluadas en el suelo y las variables de desarrollo del cultivo con éstas, se llevaron a cabo análisis de correlación de Pearson ( $p \leq 0,05$ ).



## **4.Resultados y discusión**

### **4.1 Efecto de enmiendas organicas y azufre elemental sobre las propiedades fisicoquimicas**

Se encontraron diferencias significativas en los valores de pH al final del periodo de evaluacion en los tratamientos T4, T6, T8 y T9, en los cuales se aplico S° al presentar valores de pH por debajo de 5 (Tabla 4). Mientras que el resto de los tratamientos presentaron valores de pH entre 5,5 a 6,7 (Tabla 4) posiblemente debido, a la capacidad de las raices del maiz para acidificar el suelo a travez de la excrecion de acidos organicos e hidrogeniones incluso en condiciones sodicas o de alta conductividad electrica (Petersen & Zidan *et al.*, 1990; Böttger, 1991; Kotyk *et al.*, 1991; Fan & Neumann, 2004 ).

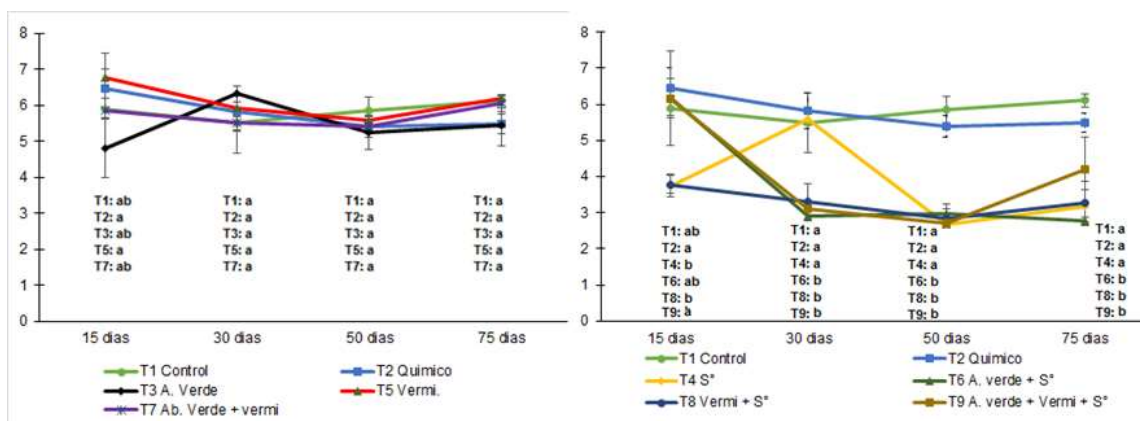


**Tabla 4.** Efecto sobre las variables químicas pH, Conductividad eléctrica (CE), Calcio y Magnesio soluble de un suelo sódico cultivado con maíz debido al empleo de enmiendas orgánicas y azufre elemental.

Tratamiento	pH				CE (dS m <sup>-1</sup> )				Calcio (meq L <sup>-1</sup> )				Magnesio(meq L <sup>-1</sup> )				
	15 dds	30 dds	50 dds	75 dds	15 dds	30 dds	50 dds	75 dds	15 dds	30 dds	50 dds	75 dds	15 dds	30 dds	50 dds	75 dds	
T1 (Control)	5,9±	5,5±	5,86±	6,11±	1,12±	2,89±	1,73±	1,42±	17,55±	15,83±	12,68±	10,83±	4,79±	6,73±	3,95±	3,18±	
	0,28 <sup>ab</sup>	0,82 <sup>a</sup>	0,37 <sup>a</sup>	0,18 <sup>a</sup>	0,32 <sup>a</sup>	1 <sup>ab</sup>	0,48 <sup>a</sup>	0,41 <sup>a</sup>	14,92 <sup>a</sup>	3,23 <sup>a</sup>	3,26 <sup>a</sup>	3,3 <sup>a</sup>	4,5 <sup>a</sup>	3,78 <sup>a</sup>	1,9 <sup>a</sup>	1,65 <sup>a</sup>	
T2 (Químico)	6,45±	5,82±	5,39±	5,48±	1,89±	2,31±	2,06±	2,92±	12,78±	16,17±	15,16±	17,5±	5,03±	5,96±	5,34±	7,29±	
	0,56 <sup>a</sup>	0,5 <sup>a</sup>	0,29 <sup>a</sup>	0,27 <sup>a</sup>	1,1 <sup>a</sup>	0,65 <sup>ab</sup>	0,87 <sup>a</sup>	0,96 <sup>a</sup>	5,92 <sup>a</sup>	2,39 <sup>a</sup>	3,3 <sup>a</sup>	1,57 <sup>a</sup>	2,96 <sup>ab</sup>	1,91 <sup>a</sup>	2,41 <sup>a</sup>	2,42 <sup>a</sup>	
T3 (Enmienda verde)	4,81±	6,32±	5,25±	5,43±	2,84±	6,78±	3,97±	2,16±	14,84±	16,4±	25,7±	15,7±	24,12±	22,33±	10,37±	6,55±	
	0,83 <sup>ab</sup>	0,22 <sup>a</sup>	0,48 <sup>a</sup>	0,57 <sup>a</sup>	1,32 <sup>a</sup>	2,45 <sup>bc</sup>	0,75 <sup>a</sup>	0,72 <sup>a</sup>	2,64 <sup>a</sup>	2,72 <sup>a</sup>	2,63 <sup>a</sup>	2,7 <sup>a</sup>	3,91 <sup>b</sup>	6,07 <sup>a</sup>	6,58 <sup>a</sup>	1,98 <sup>a</sup>	
T4 (Azufre elemental)	3,75±	5,59±	2,66±	3,19±	3,81±	2±	17,08±	13,58±	17,34±	16,02±	59,82±	55,8±	22,28±	6,13±	123,68±	83,38±	
	0,32 <sup>b</sup>	0,16 <sup>a</sup>	0,07 <sup>b</sup>	0,46 <sup>b</sup>	1,61 <sup>a</sup>	0,33 <sup>ab</sup>	1,72 <sup>b</sup>	2,46 <sup>b</sup>	2,29 <sup>a</sup>	1,45 <sup>a</sup>	0,73 <sup>b</sup>	0,2 <sup>b</sup>	2,76 <sup>ab</sup>	1,23 <sup>a</sup>	5,91 <sup>b</sup>	36,44 <sup>b</sup>	
T5 (Vermicompost)	6,75±	5,93±	5,59±	6,18±	1,14±	1,68±	3,83±	1,88±	9,12±	14,58±	14,14±	13±	2,93±	17,14±	5,75±	5,21±	
	0,69 <sup>a</sup>	0,4 <sup>a</sup>	0,25 <sup>a</sup>	0,08 <sup>a</sup>	0,29 <sup>a</sup>	0,71 <sup>a</sup>	1,21 <sup>a</sup>	0,17 <sup>a</sup>	2,79 <sup>a</sup>	4,41 <sup>a</sup>	2,22 <sup>a</sup>	1,2 <sup>a</sup>	1,51 <sup>a</sup>	9,25 <sup>a</sup>	1,42 <sup>a</sup>	0,92 <sup>a</sup>	
T6 (E. verde +Azufre)	6,2±	2,91±	2,96±	2,78±	1,41±	10,06±	13,75±	14,62±	14,21±	14,75±	96,45±	50,33±	5,38±	15,77±	138,72±	97,95±	
	0,53 <sup>ab</sup>	0,13 <sup>b</sup>	0,29 <sup>b</sup>	0,1 <sup>b</sup>	0,16 <sup>a</sup>	1,17 <sup>c</sup>	2,44 <sup>b</sup>	2,14 <sup>b</sup>	2,29 <sup>a</sup>	2,59 <sup>a</sup>	0,34 <sup>b</sup>	5,42 <sup>b</sup>	0,37 <sup>ab</sup>	12,04 <sup>a</sup>	51,27 <sup>b</sup>	18,04 <sup>b</sup>	
T7 (E. verde + Vermi.)	5,87±	5,51±	5,43±	6,05±	1,97±	3,03±	3,44±	2,17±	13,32±	17,34±	17,15±	17,15±	3,09±	8,3±	11,16±	20,64±	
	0,06 <sup>ab</sup>	0,17 <sup>a</sup>	0,25 <sup>a</sup>	0,23 <sup>a</sup>	1,36 <sup>a</sup>	0,22 <sup>ab</sup>	1,29 <sup>a</sup>	0,91 <sup>a</sup>	5,19 <sup>a</sup>	1,09 <sup>a</sup>	2,84 <sup>a</sup>	6,74 <sup>a</sup>	0,55 <sup>ab</sup>	1,14 <sup>a</sup>	4,25 <sup>a</sup>	4,29 <sup>ab</sup>	
T8 (Vermi. + Azufre)	3,78±	3,3±	2,84±	3,27±	4,38±	11,48±	18,27±	13,93±	18,66±	61,51±	82,31±	54,13±	15,24±	94,07±	209,06±	105,25±	
	0,26 <sup>b</sup>	0,5 <sup>b</sup>	0,28 <sup>b</sup>	0,61 <sup>b</sup>	0,88 <sup>a</sup>	0,83 <sup>c</sup>	0,2 <sup>b</sup>	1,09 <sup>b</sup>	0,39 <sup>a</sup>	8,66 <sup>b</sup>	12,34 <sup>b</sup>	3,07 <sup>b</sup>	1,33 <sup>ab</sup>	4,92 <sup>b</sup>	8,25 <sup>b</sup>	28,27 <sup>b</sup>	
T9 (E. verde + Vermi + Azufre)	6,16±	3,11±	2,71±	4,2±	4,75±	8,88±	14,6±	15,72±	18,73±	56,24±	74,42±	52,6±	5,21±	71,04±	135,83±	97,49±	
	1,31 <sup>a</sup>	0,1 <sup>b</sup>	0,02 <sup>b</sup>	0,89 <sup>b</sup>	1,39 <sup>a</sup>	0,23 <sup>c</sup>	1,15 <sup>b</sup>	2,06 <sup>b</sup>	0,22 <sup>a</sup>	0,04 <sup>b</sup>	4,91 <sup>b</sup>	2 <sup>b</sup>	3,47 <sup>ab</sup>	0,58 <sup>b</sup>	14,64 <sup>b</sup>	31,08 <sup>a</sup>	
Significancia efecto tratamientos		p<0,05				p<0,05				p<0,05				p<0,05			

Los valores representan la media de n=3 con su respectivo error estándar. Para cada muestreo y parámetro, valores con letras diferentes presentan diferencias estadísticamente significativas (p<0,05) de acuerdo a la comparación de medias de Tukey.

Solamente los tratamientos en donde se aplicó S° presentaron diferencias significativas ( $<0,05$ ) en los valores de pH (Tabla 4), con respecto al control a lo largo del experimento (Fig. 2), lo cual indica que gran parte del S° fue oxidado. A pesar que en la literatura se menciona que aplicaciones de enmiendas verdes y vermicompost solas pueden disminuir el pH de suelos sódicos a valores significativamente más bajo que el control (Basavaraja *et al.*, 2007; Mahmoud & Ibrahim, 2012; Mogollón *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2014), esta capacidad de reducción de pH depende del tiempo de acción de la enmienda y puede verse interferida, por la condición intrínseca del suelo con respecto a la concentración de carbonatos y bicarbonatos los cuales aumentan la capacidad buffer del suelo ante los cambios de pH (van Breemen *et al.*, 1983). El comportamiento de los resultados obtenidos es parecido a lo encontrado en suelos con altas concentraciones de carbonatos de calcio (Fig. 2), donde aplicaciones de materia orgánica no tuvieron efecto sobre el pH del suelo en comparación con el efecto de los tratamientos de S° sobre la reducción del pH (Neilsen *et al.*, 1993; Hashemimajd *et al.*, 2012).



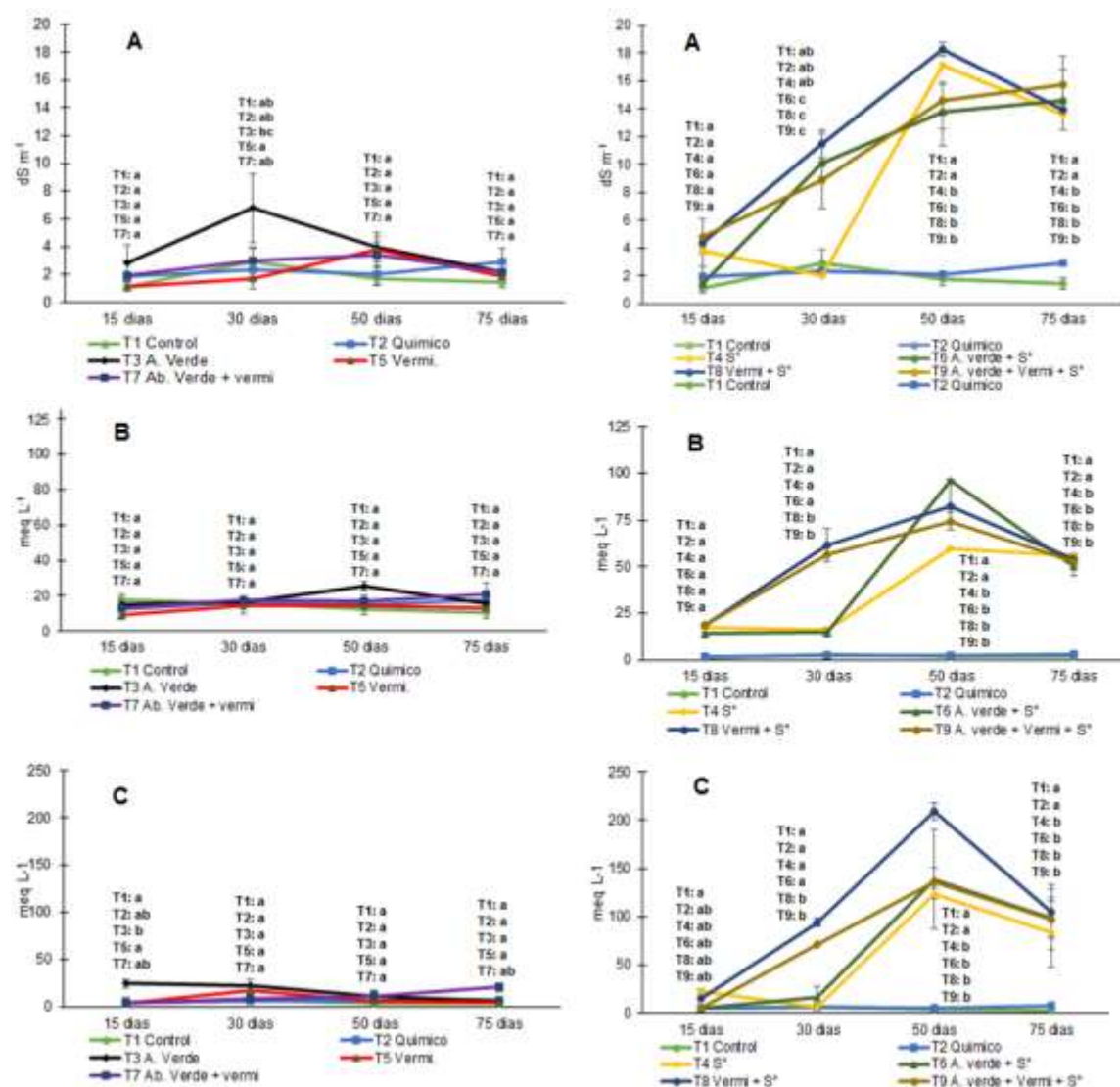
**Figura 2.** pH de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

La conductividad eléctrica (CE), concentración de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  presentaron los mayores valores en los tratamientos en donde se aplicó S° (Tabla 4) al presentar valores superiores a  $10 \text{ dSm}^{-1}$  y  $50 \text{ meqL}^{-1}$  respectivamente. Los mayores valores de CE,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  en los tratamientos con S° (Fig. 3) se debe al efecto del ácido sulfúrico sobre la disolución de carbonatos y bicarbonatos, lo cual permite la formación de sales de mayor solubilidad, como el yeso, y por ende contribuyen al aumento de la CE, y aumenta la concentración de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  (Modaihsh *et al.*, 1989; García de la Fuente *et al.*, 2007;



Hashemimajd *et al.*, 2012;) además del reemplazo del  $\text{Na}^+$  por  $\text{Ca}^{+2}$ , lo cual también produce un aumento en la CE de la rizosfera (Maggio *et al.*, 2004). No se presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre la CE de los tratamientos en los que se aplicaron enmiendas orgánicas y el control (Tabla 4), similar a lo encontrado por Mogollón *et al.* (2011), Oo *et al.* (2013) y Singh *et al.* (2014) en donde las aplicaciones de materia orgánica, contribuyen a disminuir o mantener la CE de suelos sodicos o salinos, debido al aumento de la lixiviación de las sales.

Es de mencionar que entre los tratamientos orgánicos T7 fue el que presentó los mayores valores de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  (Fig. 3), a pesar que aplicaciones de residuos vegetales y vermicompost en suelos sodicos aumentan la concentración de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  (Mahmoud & Ibrahim, 2012; Amini *et al.*, 2015), esto puede estar sujeto a las cantidades de enmienda orgánica aplicada y a la concentración de Ca de los mismos, la cual varía dependiendo de la fuente, es así como para este estudio la mezcla de vermicompost y enmienda verde pudieron aumentar la concentración de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , debido a la cantidad de materia orgánica aplicada.



**Figura 3.** Conductividad eléctrica (A), Calcio (B) y Magnesio (C) en solución de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

La concentración de sodio soluble mostró diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos después del día 30 (Tabla 5), siendo los tratamientos en los que se aplicó  $S^0$  mezclados con enmiendas orgánicas, los que presentaron los mayores valores de sodio soluble en el tiempo de experimentación ( $> 8 \text{ meq L}^{-1}$ ), mientras que T3 presentó las menores concentraciones ( $< 3,5 \text{ meq L}^{-1}$ ) (Fig. 4). Los tratamientos en los que se aplicó  $S^0$  mezclados con enmiendas orgánicas aumentaron la concentración de sodio hasta el día

50, manifestando una posterior disminucion de la concentracion para el dia 75 (Fig. 4). lo anterior podria deberse a que en estos tratamientos ocurrio posiblemente desplazamiento de iones sodio por  $\text{Ca}^{+2}$  los cuales fueron lixiviados posteriormente (Ilyas *et al.*, 1997), disminuyendo de esta forma su concentracion.

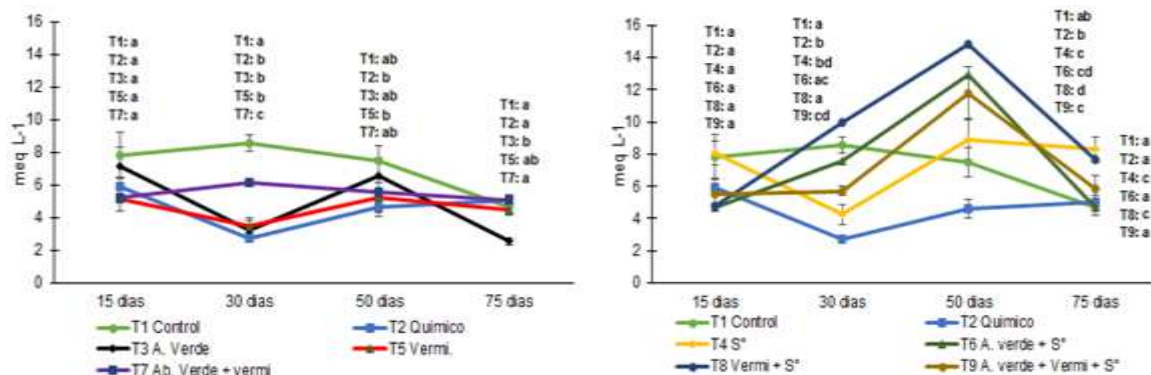
**Tabla 5.** Sodio en solución y RAS de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

Tratamientos	SODIO (meq/L)				RAS (mmol/L)			
	15 dds	30 dds	50 dds	75 dds	15 dds	30 dds	50 dds	75 dds
T1 (Control)	7,84 $\pm$ 1,37 <sup>a</sup>	8,55 $\pm$ 0,49 <sup>a</sup>	7,5 $\pm$ 0,93 <sup>ab</sup>	4,65 $\pm$ 0,48 <sup>a</sup>	2,41 $\pm$ 0,45 <sup>a</sup>	2,45 $\pm$ 0,7 <sup>a</sup>	2,47 $\pm$ 0,7 <sup>a</sup>	1,96 $\pm$ 0,11 <sup>a</sup>
T2 (Químico)	5,92 $\pm$ 0,49 <sup>a</sup>	2,71 $\pm$ 0,18 <sup>b</sup>	4,61 $\pm$ 0,58 <sup>b</sup>	5,04 $\pm$ 0,38 <sup>a</sup>	2,08 $\pm$ 1,06 <sup>a</sup>	0,75 $\pm$ 0,13 <sup>b</sup>	1,35 $\pm$ 0,26 <sup>b</sup>	1,5 $\pm$ 0,09 <sup>b</sup>
T3 (Enmienda verde)	7,12 $\pm$ 1,22 <sup>a</sup>	3,19 $\pm$ 0,63 <sup>b</sup>	6,59 $\pm$ 1,02 <sup>ab</sup>	2,54 $\pm$ 0,2 <sup>b</sup>	1,41 $\pm$ 0,09 <sup>a</sup>	0,71 $\pm$ 0,24 <sup>b</sup>	0,98 $\pm$ 0,13 <sup>b</sup>	0,74 $\pm$ 0,05 <sup>cd</sup>
T4 (Azufre elemental)	8,03 $\pm$ 0,75 <sup>a</sup>	4,24 $\pm$ 0,62 <sup>bd</sup>	8,88 $\pm$ 1,22 <sup>c</sup>	8,28 $\pm$ 0,81 <sup>c</sup>	1,71 $\pm$ 0,16 <sup>a</sup>	1,19 $\pm$ 0,18 <sup>ab</sup>	0,89 $\pm$ 0,16 <sup>b</sup>	1,03 $\pm$ 0,24 <sup>c</sup>
T5 (Vermicompost)	5,14 $\pm$ 0,55 <sup>a</sup>	3,49 $\pm$ 0,44 <sup>b</sup>	5,22 $\pm$ 0,91 <sup>b</sup>	4,43 $\pm$ 0,11 <sup>ab</sup>	2 $\pm$ 0,54 <sup>a</sup>	0,87 $\pm$ 0,4 <sup>b</sup>	1,52 $\pm$ 0,26 <sup>b</sup>	1,48 $\pm$ 0,12 <sup>b</sup>
T6 (E. verde +Azufre)	4,67 $\pm$ 0,49 <sup>a</sup>	7,55 $\pm$ 0,09 <sup>ac</sup>	12,96 $\pm$ 1,15 <sup>cd</sup>	4,66 $\pm$ 0,57 <sup>a</sup>	1,38 $\pm$ 0,27 <sup>a</sup>	2,09 $\pm$ 0,52 <sup>a</sup>	1,14 $\pm$ 0,12 <sup>b</sup>	0,54 $\pm$ 0,03 <sup>d</sup>
T7 (E. verde + Vermi.)	5,2 $\pm$ 0,78 <sup>a</sup>	6,18 $\pm$ 0,1 <sup>c</sup>	5,6 $\pm$ 0,56 <sup>ab</sup>	5,03 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	1,71 $\pm$ 0,55 <sup>a</sup>	1,6 $\pm$ 0,25 <sup>ab</sup>	1,4 $\pm$ 0,2 <sup>b</sup>	1 $\pm$ 0,02 <sup>c</sup>
T8 (Vermi. + Azufre)	4,79 $\pm$ 0,15 <sup>a</sup>	9,93 $\pm$ 1,34 <sup>a</sup>	14,81 $\pm$ 1 <sup>d</sup>	7,66 $\pm$ 1,43 <sup>c</sup>	1,09 $\pm$ 0,13 <sup>a</sup>	1,08 $\pm$ 0,21 <sup>b</sup>	1,19 $\pm$ 0,12 <sup>b</sup>	0,95 $\pm$ 0,2 <sup>c</sup>
T9 (E. verde + Vermi + Azufre)	5,5 $\pm$ 0,57 <sup>a</sup>	5,72 $\pm$ 0,27 <sup>cd</sup>	11,8 $\pm$ 1,63 <sup>c</sup>	5,8 $\pm$ 0,85 <sup>a</sup>	1,46 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	0,68 $\pm$ 0,08 <sup>b</sup>	1,06 $\pm$ 17 <sup>b</sup>	0,69 $\pm$ 0,18 <sup>cd</sup>
Significancia efecto tratamientos	p<0,05				p<0,05			

Los valores representan la media de n=3 con su respectivo error estándar. Para cada muestreo y parámetro, valores con letras diferentes presentan diferencias estadísticamente significativas (p<0,05) de acuerdo a la comparación de medias de Tukey.

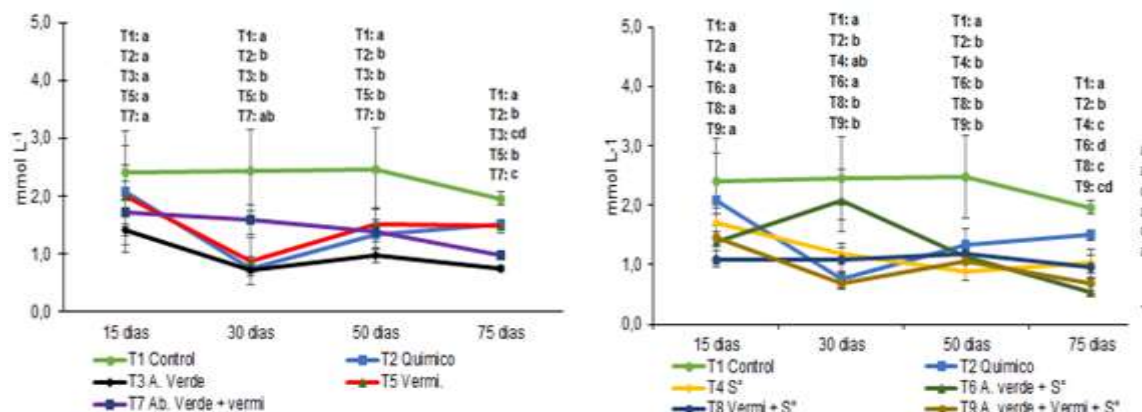
Los tratamientos T2, T3 y T5, presentaron al igual que T1, tendencia a disminuir la concentracion de sodio soluble con el tiempo (Fig. 4), lo cual indica que si bien ocurre remocion de iones sodio de la solucion del suelo el desplazamiento de iones sodios a la solucion del suelo fue poco, lo anterior corresponde a lo observado en suelos sodicos manejados con enmiendas organicas y/o plantas fitoremediadoras (Ashraf *et al.*, 2010; Gharaibeh *et al.*, 2011; Mahmoodabadi *et al.*, 2012; Mahmoud & Ibrahim, 2012), donde los tratamientos presentaron tendencia a disminuir la concentracion de sodio desde el primer año debido a la lixiviacion de sodio por aumento de la agregacion del suelo ademas de que parte de este es absorbido por las plantas, siendo en plantas como el

maíz acumulado principalmente en las raíces (Dias *et al.*, 2004; Farooq *et al.*, 2015) lo cual también contribuye a que disminuya la concentración de sodio a medida que el cultivo se desarrolla.



**Figura 4.** Sodio en solución de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

Con respecto a la relación de absorción de sodio (RAS) se encontró que disminuyó al igual que el sodio soluble, en todos periodos evaluados (Tabla 5), lo cual indica que las condiciones fisicoquímicas del suelo sódico pueden mejorar con el establecimiento del cultivo de maíz, presentándose el mayor porcentaje de disminución del RAS (>49%) en aquellos tratamientos en donde se aplicó enmienda verde sola o mezclada (Fig. 5), posiblemente debido a que la descomposición de la materia orgánica produce cargas negativas que atraen el exceso de iones sodio de la solución, disminuyendo de esta forma la RAS (Singh *et al.*, 2013a). Lo anterior corresponde a lo observado en otros trabajos (Wong *et al.*, 2010; Yazdanpanah *et al.*, 2012; Yazdanpanah & Mahmoodabadi, 2013; Amini *et al.*, 2015; Chaganti *et al.*, 2015;) donde se utilizaron enmiendas orgánicas y minerales sobre suelos sódicos, encontrándose que los mayores porcentajes de reducción de RAS ocurrieron en los tratamientos en los que se aplicaron residuos vegetales y mezclas orgánico minerales. De otro lado la presencia de azufre elemental también contribuyó a disminuir el RAS (Fig. 5), debido que la formación de ácido sulfúrico contribuye a la disolución de minerales de calcio y magnesio, lo que aumenta la entrada de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  en la solución del suelo disminuyendo de esta forma el RAS (Yazdanpanah & Mahmoodabadi, 2013; Yazdanpanah *et al.*, 2012).



**Figura 4.** Sodio reactivo en solución (RAS) de un suelo sódico cultivado con *Zea mayz* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

A pesar de haberse utilizado enmiendas orgánicas en algunos de los tratamientos, se observó que de forma en general ninguno de los tratamientos presentó efectos significativos sobre el CO (Tabla 6), aun así aquellos tratamientos en los que se utilizó vermicompost mezclado con azufre elemental o enmienda verde presentaron los mayores valores de CO, mientras que en los que se utilizó enmienda verde sola o mezclada con azufre fueron los menores (Tabla 4). Lo anterior se debe al efecto del sodio y el ácido sulfúrico sobre la solubilidad de la materia orgánica (Gupta *et al.*, 1988; Wong *et al.*, 2010), la cual es mayor en materiales orgánicos con alta concentración de compuestos orgánicos solubles (Clark *et al.*, 2007b; Yu *et al.*, 2014; Amini *et al.*, 2015) como la enmienda verde en comparación al vermicompost, lo que evita la acumulación de materia orgánica en el suelo (Wong *et al.*, 2010) a corto plazo, a menos que se realicen varias aplicaciones en el tiempo (Ansari, 2008; Trivedi *et al.*, 2017).

Dado que la CICE corresponde al número de moles de cationes absorbidos en una unidad de masa del suelo, el aumento de sus valores está también estrechamente relacionado con el aumento de la concentración de las bases y la absorción de los mismos. Se observó que los tratamientos que correspondieron a mezclas de  $S^0$  y enmiendas orgánicas fueron los que presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con T1 al finalizar el experimento al presentar valores superiores a  $50 \text{ meq} \cdot 100\text{g}^{-1}$  (Tabla 6), lo anterior debido que la oxidación del  $S^0$  contribuye al aumento de la concentración de

cationes intercambiables, por disolución de minerales, los cuales en T4 pudieron haber sido lixiviados dada la capacidad limitada de absorción del suelo, mientras que los tratamientos que correspondían a mezclas de S° y enmiendas orgánicas, debido al efecto desnaturador del ácido sulfúrico sobre la celulosa y lignina, puede aumentar la superficie de contacto de los materiales lignocelulolíticos y la capacidad de adsorción de metales divalentes de materiales celulolíticos (Harman *et al.*, 2007; Hubbe *et al.*, 2012; Mateus *et al.*, 2012; Geetha & Belagali, 2013; Sinha *et al.*, 2013) al aumentar la exposición de los grupos carboxílicos, principal grupo de compuestos orgánicos que se le atribuye capacidad de absorción de metales en materiales lignocelulolíticos (Harman *et al.*, 2007; Hubbe *et al.*, 2012). De otro lado se ha registrado que materiales vegetales provenientes de plantas como *Prosopis cineraria* poseen capacidad de absorción de metales a valores de pH ácidos (Sinha *et al.*, 2013), parecidos a los encontrados en los tratamientos de azufre elemental y enmiendas orgánicas.

**Tabla 6.** Carbono orgánico, Capacidad de intercambio catiónico efectiva, Porcentaje de saturación de sodio, Diámetro geométrico medio y Diámetro promedio y estabilidad estructural de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

Tratamientos	%CO	CICE (meq/100g)	PSI (%)	DGM (mm)	DPM (mm)
<b>T1 (Control)</b>	2,06 $\pm$ 0,27 <sup>a</sup>	30,66 $\pm$ 2,7 <sup>a</sup>	2,74 $\pm$ 0,11 <sup>a</sup>	2,66 $\pm$ 0,23 <sup>a</sup>	2,41 $\pm$ 0,22 <sup>a</sup>
<b>T2 (Químico)</b>	1,96 $\pm$ 0,34 <sup>a</sup>	32,14 $\pm$ 8,48 <sup>a</sup>	1,51 $\pm$ 0,26 <sup>ab</sup>	2,92 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>	2,53 $\pm$ 0,28 <sup>a</sup>
<b>T3 (Enmienda verde)</b>	1,67 $\pm$ 0,44 <sup>a</sup>	30,56 $\pm$ 2,68 <sup>a</sup>	1,28 $\pm$ 0,25 <sup>ab</sup>	2,8 $\pm$ 0,28 <sup>a</sup>	2,09 $\pm$ 0,37 <sup>a</sup>
<b>T4 (Azufre elemental)</b>	2,01 $\pm$ 0,46 <sup>a</sup>	34,36 $\pm$ 4,93 <sup>a</sup>	0,96 $\pm$ 0,48 <sup>b</sup>	2,71 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>	2,31 $\pm$ 0,46 <sup>a</sup>
<b>T5 (Vermicompost)</b>	2,04 $\pm$ 0,22 <sup>a</sup>	30,24 $\pm$ 2,31 <sup>a</sup>	2,8 $\pm$ 0,08 <sup>a</sup>	3,09 $\pm$ 0 <sup>a</sup>	2,98 $\pm$ 0,22 <sup>ab</sup>
<b>T6 (E. verde+ Azufre)</b>	1,92 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>	82,05 $\pm$ 16,91 <sup>b</sup>	0,56 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup>	3,41 $\pm$ 0,54 <sup>a</sup>	3,06 $\pm$ 0,75 <sup>ab</sup>
<b>T7 (E. verde + Vermi.)</b>	2,58 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	37,82 $\pm$ 2,32 <sup>a</sup>	1,21 $\pm$ 0,27 <sup>ab</sup>	2,77 $\pm$ 0,24 <sup>a</sup>	2,21 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>
<b>T8 (Vermi. + Azufre)</b>	2,23 $\pm$ 1,09 <sup>a</sup>	71,67 $\pm$ 8,62 <sup>b</sup>	0,89 $\pm$ 0,05 <sup>b</sup>	2,84 $\pm$ 0,71 <sup>a</sup>	2,76 $\pm$ 0,92 <sup>a</sup>
<b>T9 (E. verde + Vermi + Azufre)</b>	2,45 $\pm$ 0,27 <sup>a</sup>	83,43 $\pm$ 15,8 <sup>b</sup>	0,53 $\pm$ 0,61 <sup>b</sup>	2,85 $\pm$ 0,27 <sup>a</sup>	2,44 $\pm$ 0,27 <sup>a</sup>
<b>Significación</b>	NS	*	*	NS	NS

NS, no significativo; \*, significativo a  $p < 0,05$  obtenida por ANOVA.

Con respecto al porcentaje de sodio intercambiable (PSI) todos los tratamientos presentaron cambios significativo en el valor de la PSI al finalizar el experimento, observandose valores por debajo del inicial ( $<15$ ) en todos los tratamientos incluyendo el control (Tabla 6), lo cual podría deberse al efecto de las raíces de las plantas sobre las características de suelos afectados por sodio, ya que se ha reportado que la presencia de plantas en suelos sodicos contribuye a disminuir la concentración de sodio a través del aumento de la concentración de  $H^+$ ,  $Ca^{+2}$  y  $CO_2$  en el suelo lo cual permite el reemplazo y lixiviación de  $Na^+$  de los coloides del suelo (Qadir *et al.*, 2007; Wong *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2013A). Aquellos tratamientos con  $S^o$  presentaron los menores valores de PSI al presentar valores por debajo del 1% (Tabla 4), lo cual podría indicar que en estos tratamientos hubo una mayor lixiviación de  $Na^+$  y reemplazo de los sitios de intercambio por  $Ca^{+2}$  y  $Mg^{+2}$ , a raíz de la mayor solubilización de minerales del suelo gracias a la formación de ácido sulfúrico (Araujo *et al.*, 2015). Contrario a T5 que presentó valores parecidos a T1.

La estabilidad estructural del suelo expresada como DPM y DGM (Tabla 6), no presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con respecto a T1, ya que se halló que los valores para el DPM y DGM (Tabla 6) en todos los tratamientos correspondía a suelos estables al presentar valores mayores de 2 mm en ambos parámetros (Lobo & Pulido, 2006), valores similares a lo observado en la rizosferas de plantas de maíz que debido a diversos mecanismos como secreción de carbohidratos y arquitectura de raíces pueden potencializar la formación de agregados estables (Morel *et al.*, 1991; Torres *et al.*, 2013). Por último dado el papel de la materia orgánica sobre la estabilidad estructural del suelo, debido a su efecto cementante, la falta de diferencias significativas entre tratamientos para el contenido de CO también contribuyó a que no se observaran diferencias en los valores de DPM y DGM entre los tratamientos.

## **4.2 Efecto de enmiendas orgánicas y azufre elemental sobre las propiedades biológicas**

### **4.2.1 Biomasa y respiración microbiana**

Desde quince días después de sembradas las plantas de maíz se encontró que todos los tratamientos presentaron mayor biomasa microbiana (BMC) con respecto a T1 ( $71,97 \mu g C g^{-1}$  suelo seco) (Tabla 7), aunque solamente los tratamientos T5 y T7, presentaron

diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Posteriormente entre los 30 y 50 días la mayoría de los tratamientos aumento su BMC (Fig. 5), la cual fue significativamente diferente a T1 cuando presentaron valores superiores a  $150 \mu\text{g C g}^{-1}$  suelo seco. Ya para los 75 días los tratamientos T2 y orgánicos tendieron a disminuir su BMC a valores similares a T1 (Fig. 5), menores de  $150 \mu\text{g C g}^{-1}$  suelo seco, lo cual corresponde a lo planteado por Wong *et al.* (2010) en suelos sódicos enmendados con materia orgánica que a medida que disminuye la disponibilidad de sustrato decae la BMC; mientras que en los tratamientos con  $\text{S}^{\circ}$  se mantienen en valores significativamente mayores, debido a que mejores condiciones fisicoquímicas del suelo y a que además el  $\text{S}^{\circ}$  puede ser incorporado en la biomasa microbiana ya que (Jaggi *et al.* 1999).

**Tabla 7.** Biomasa microbiana (BMC) y Respiración microbiana del suelo (RMS) de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

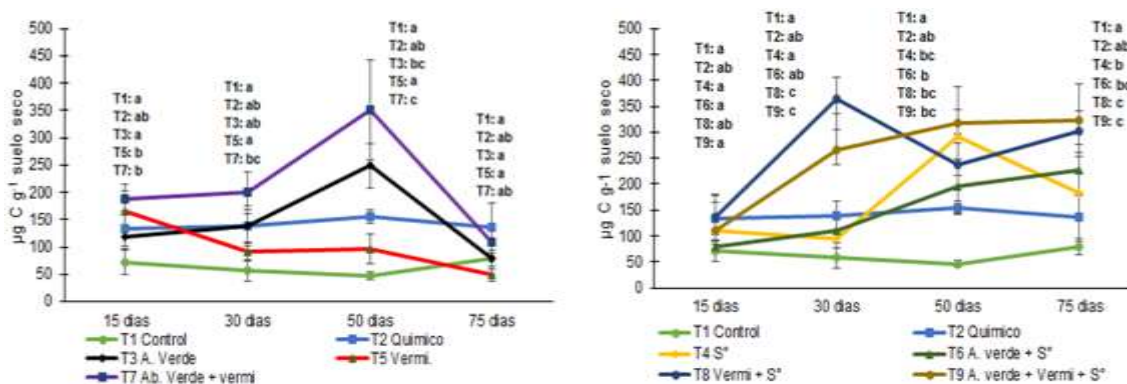
Tratamientos	BMC ( $\mu\text{g C g}^{-1}$ suelo seco)				RMS ( $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ suelo seco)			
	15 dds	30 dds	50 dds	75 dds	15 dds	30 dds	50 dds	75 dds
T1 (Control)	71,97 $\pm$ 21,56 <sup>a</sup>	57,61 $\pm$ 9,99 <sup>a</sup>	46,9 $\pm$ 7,08 <sup>a</sup>	79,01 $\pm$ 14,82 <sup>a</sup>	86,09 $\pm$ 21,43 <sup>a</sup>	82,77 $\pm$ 4,31 <sup>a</sup>	180,1 $\pm$ 40,1 <sup>a</sup>	148,27 $\pm$ 46,8 <sup>a</sup>
T2 (Químico)	134,04 $\pm$ 32,19 <sup>ab</sup>	137,97 $\pm$ 29,22 <sup>ab</sup>	155,71 $\pm$ 11,26 <sup>ab</sup>	135,3 $\pm$ 45,24 <sup>ab</sup>	84,38 $\pm$ 16,75 <sup>a</sup>	73,47 $\pm$ 14,03 <sup>a</sup>	146,26 $\pm$ 33,9 <sup>ab</sup>	161,92 $\pm$ 27,58 <sup>a</sup>
T3 (Enmienda verde)	118,11 $\pm$ 21,84 <sup>a</sup>	138,84 $\pm$ 36,81 <sup>ab</sup>	248,74 $\pm$ 40,58 <sup>bc</sup>	79,58 $\pm$ 30,07 <sup>a</sup>	67,77 $\pm$ 20,65 <sup>a</sup>	76,86 $\pm$ 16,42 <sup>a</sup>	122,95 $\pm$ 19,21 <sup>ab</sup>	328,59 $\pm$ 14,19 <sup>c</sup>
T4 (Azufre elemental)	110,97 $\pm$ 20,13 <sup>a</sup>	95,15 $\pm$ 18,75 <sup>a</sup>	291,67 $\pm$ 51,55 <sup>bc</sup>	182,17 $\pm$ 39,44 <sup>b</sup>	66,66 $\pm$ 3,09 <sup>a</sup>	82 $\pm$ 22,93 <sup>a</sup>	70,89 $\pm$ 24,14 <sup>b</sup>	139,31 $\pm$ 48,02 <sup>a</sup>
T5 (Vermicompost)	166,66 $\pm$ 36,92 <sup>b</sup>	90,5 $\pm$ 16,45 <sup>a</sup>	96,55 $\pm$ 27,21 <sup>a</sup>	49,29 $\pm$ 11,18 <sup>a</sup>	80,58 $\pm$ 34,94 <sup>a</sup>	66,41 $\pm$ 5,62 <sup>a</sup>	76,57 $\pm$ 12,13 <sup>b</sup>	263,14 $\pm$ 47,95 <sup>bc</sup>
T6 (E. verde +Azufre)	79,44 $\pm$ 52 <sup>a</sup>	109,41 $\pm$ 21,68 <sup>ab</sup>	194,98 $\pm$ 52,85 <sup>b</sup>	226,31 $\pm$ 48,96 <sup>bc</sup>	84,26 $\pm$ 20,54 <sup>a</sup>	86,14 $\pm$ 27,87 <sup>a</sup>	161,73 $\pm$ 20,86 <sup>a</sup>	181,78 $\pm$ 30,83 <sup>ab</sup>
T7 (E. verde + Vermi.)	187,61 $\pm$ 28,59 <sup>b</sup>	199,14 $\pm$ 38,55 <sup>bc</sup>	351,76 $\pm$ 91,24 <sup>c</sup>	108,95 $\pm$ 31,74 <sup>ab</sup>	36,48 $\pm$ 6,22 <sup>a</sup>	95,24 $\pm$ 25,31 <sup>a</sup>	185,49 $\pm$ 39,54 <sup>a</sup>	179,33 $\pm$ 26,32 <sup>ab</sup>
T8 (Vermi. + Azufre)	136,93 $\pm$ 29,35 <sup>ab</sup>	364,48 $\pm$ 59,66 <sup>c</sup>	237,72 $\pm$ 21,8 <sup>bc</sup>	301,59 $\pm$ 40,52 <sup>c</sup>	39,42 $\pm$ 6,08 <sup>a</sup>	66,89 $\pm$ 18,41 <sup>a</sup>	53,77 $\pm$ 11,29 <sup>bc</sup>	132,11 $\pm$ 38,32 <sup>a</sup>
T9 (E. verde + Vermi + Azufre)	111,17 $\pm$ 27,61 <sup>a</sup>	266,25 $\pm$ 29,79 <sup>c</sup>	318,71 $\pm$ 22,85 <sup>bc</sup>	323,61 $\pm$ 69,29 <sup>c</sup>	51 $\pm$ 5,3	120,97 $\pm$ 22,8	145,66 $\pm$ 43,93 <sup>ab</sup>	135,85 $\pm$ 10,79 <sup>a</sup>
Significancia efecto tratamientos	$p < 0,05$				NS			

Los valores representan la media de  $n=3$  con su respectivo error estándar. Para cada muestreo y parámetro, valores con letras diferentes presentan diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) de acuerdo a la comparación de medias de Tukey.

Debido que los suelos sódicos se caracterizan por poseer una baja concentración de materia orgánica, por su baja capacidad de secuestrar el carbono y alta tasa de descomposición, a causa del efecto dispersante y disolvente del sodio sobre la materia



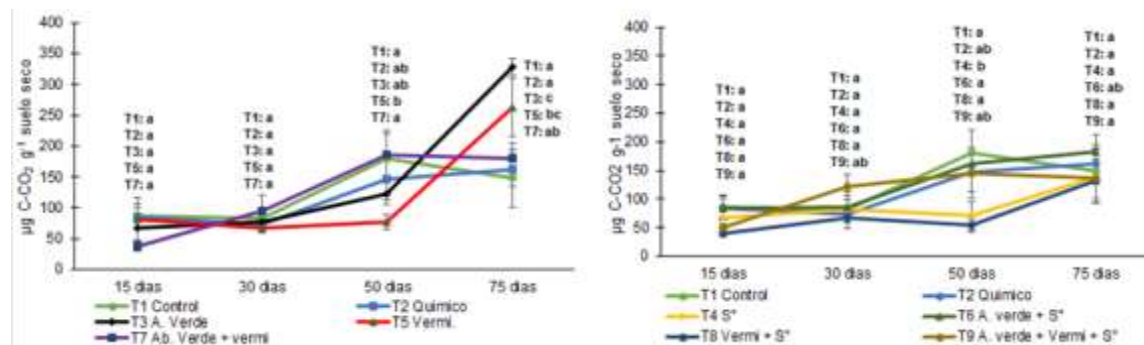
orgánica (Wong *et al.*, 2010; Singh, 2016); aplicaciones de enmiendas orgánicas y/o siembra de plantas en suelos sódicos pueden conllevar a incrementos de la respiración microbiana del suelo (RMS), dependiendo del tipo de sustrato, especie de planta y niveles de PSI y RAS en el suelo (Wong *et al.*, 2010), a pesar de lo anterior aplicaciones de enmiendas orgánicas, materiales ricos en Ca y/o acidulantes, en concentraciones que permitan un desplazamiento considerable del sodio, permiten de forma en general aumentar la concentración de materia orgánica y mantener bajas tasas de RMS (Clark *et al.*, 2007b; Wong *et al.*, 2010; Singh, 2016), debido a una menor disponibilidad de la materia orgánica a la descomposición por el efecto agregante del  $\text{Ca}^{+2}$  sobre la misma (Wong *et al.*, 2010; Mahmoodabadi *et al.*, 2012).



**Figura 5.** Biomasa microbiana de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

En relación a los resultados presentados por parte de los tratamientos utilizados sobre la RMS, se observó que en los 15 y 30 días, ninguno de los tratamientos presentó diferencias significativas con respecto al control (Tabla 7), al mantener valores alrededor de  $\pm 86 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$  suelo seco. Para el día 50 la mayoría de los tratamientos tendieron a aumentar la RMS sobre  $120 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$  suelo seco sin presentar diferencias significativas con respecto al control (Fig. 6), a excepción de los tratamientos T4, T5 y T8 los cuales presentaron diferencias significativas al mantener valores parecidos a los dos muestras anteriores por debajo de  $80 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$  suelo seco (Fig. 6). Para el día 75 se destaca la presencia de los mayores valores de RMS para el experimento, en T3 y T5 con 329 y 263  $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$  suelo seco respectivamente (Tabla 7), además del aumento

de la RMS de forma general en todos los tratamientos, en especial T4 y T8 los cuales aumentan a valores parecidos al control, mientras que T3 y T5 aumentaron de forma significativa (Fig. 6).



**Figura 6.** Respiración microbiana-CO<sub>2</sub> de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

Se observó que la mayor parte de los tratamientos mantuvieron valores parecidos de RMS durante los primeros 30 días del experimento, lo cual puede indicar que las los nutrimentos necesarios para estimular la actividad microbiana del suelo en especial los compuestos orgánicos solubles no fueron aumentados en ninguno de los tratamientos, los cuales se ha comprobado presentan alta correlación con la RMS en suelos degradados por sales (Wong *et al.*, 2010; Singh, 2016). De igual forma la presencia de plantas de maíz también contribuye en el comportamiento anteriormente descrito, ya que la rizosfera de las plantas modulan la RMS a través de la secreción de compuestos orgánicos solubles o inhibición de ciertas poblaciones de microorganismos (Liljeroth, *et al.*, 1994; Fontaine *et al.*, 2003; Berendsen *et al.*, 2012), donde en suelos con bajas concentraciones de nitrógeno, como los sódicos, las plantas tienden a secretar carbohidratos a bajas y constantes concentraciones en etapas iniciales de crecimiento, con el fin de estimular el desarrollo de microorganismos especialistas capaces de despolimerizar residuos orgánicos complejos (Liljeroth *et al.*, 1994; Fontaine *et al.*, 2003;) por lo que la BMS aumenta pero no la RMS.

Para el día 50 todos los tratamientos presentaron tendencia a aumentar la RMS (Fig. 6). Lo cual puede indicar que ocurrió un cambio en la estructura de la comunidad de los microorganismos, quizás por aumento en la disponibilidad de nutrientes (Fontaine *et al.*,

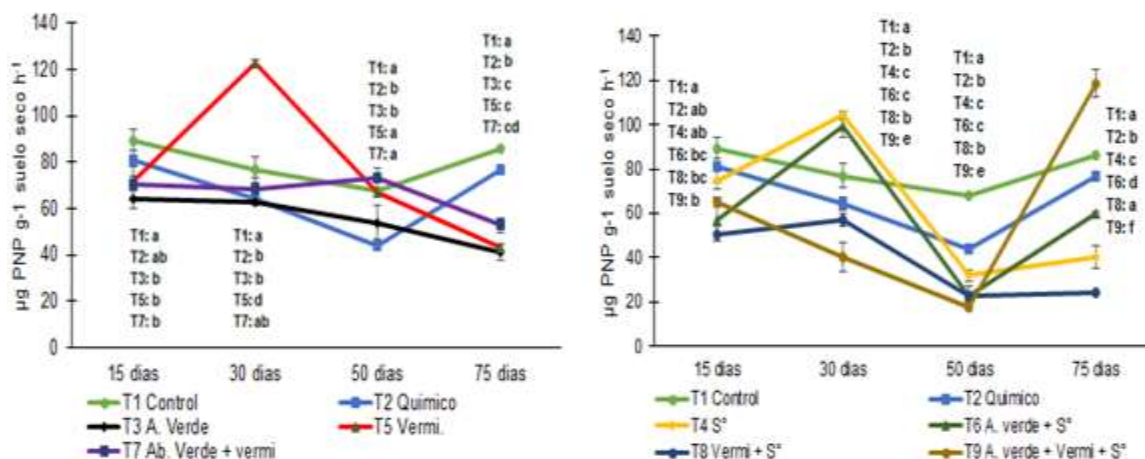
2003), de igual manera la edad del cultivo y la disminución del efecto modulador de la rizosfera sobre la microbiota del suelo también contribuye al aumento de la RMS, pues al ir envejeciendo las plantas disminuye la excreción de carbohidratos (Liljeroth *et al.*, 1994; Fu *et al.*, 2002;) y las raíces de estas pueden ser utilizadas por los microorganismos descomponedores.

Por otra parte el mantenimiento de los valores de RMS en la mayoría de los tratamientos en los días 50 y 75 (Fig. 6), corresponde a lo reportado también en estudios donde se ha adicionado enmiendas orgánicas y/o minerales a suelos sódicos, encontrándose que posterior a periodos de aumentos de la RMS y BMS las tasas de ambos parámetros llegan a una fase de que se mantienen los valores y posteriormente una fase de disminución (Kuzyakov *et al.*, 2000; Wong *et al.* 2008; Wong *et al.*, 2009), aunque se destaca que al final del experimentos los tratamientos orgánicos presentaron tendencia al aumento de los valores de RMS, lo anterior puede deberse al efecto dispersante del sodio sobre la materia orgánica, al aumentar la disolución y disponibilidad de esta para los microorganismos, por lo que dichas poblaciones se encuentran en etapa de crecimiento exponencial al presentarse altas concentraciones de compuestos fácilmente asimilables (Kuzyakov *et al.*, 2000).

## **4.2.2 Enzimas del suelo**

### **4.2.2.1 Fosfatasa alcalina y acida**

En el presente ensayo se encontró que la actividad fosfatasa alcalina tendió a disminuir en todos los tratamientos a lo largo del experimento (Fig. 7), de forma parecida a lo reportado en suelos sódicos en procesos de restauración, en donde a medida que el pH y concentración de Na<sup>+</sup> disminuye así pues la actividad fosfatasa alcalina también (Singh *et al.* 2013a).



**Figura 7.** Fosfatasa alcalina de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

Particularmente para los tratamientos en los que se aplicó S<sup>0</sup> se observaron los menores valores en la actividad fosfatasa alcalina ( $< 50 \mu\text{g PNP g}^{-1}$  suelo seco) (Tabla 8) lo cual pudo deberse ya sea por efecto directo de la aplicación de azufre elemental al inhibir ciertas poblaciones de microorganismos (Wyszkowska *et al.*, 2001) o indirectamente debido a que la oxidación del azufre elemental disminuye el pH del suelo, liberando fosfatos atrapados en carbonatos en suelos sódicos y alcalinos (Jaggi *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2010; Ye *et al.*, 2011; Araujo *et al.*, 2015) lo cual puede inhibir la actividad de las fosfatasas. De la misma forma los tratamientos en donde se aplicó enmiendas orgánicas también se observaron bajos valores de actividad fosfatasa alcalina (Fig. 7), debido tal vez a que aplicaciones de este tipo de enmienda también liberar fósforo inmovilizado en carbonatos (Rahi *et al.*, 2012; Vallejo *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2014), por lo que su aplicación también podría disminuir la actividad de la fosfatasa alcalina.

**Tabla 8.** Fosfatasa alcalina (A) y acida (B) de un suelo sódico cultivado con *Zea mayz* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

Tratamientos	F. alcalina ( $\mu\text{g PNP g}^{-1}$ suelo seco)				F. acida ( $\mu\text{g PNP g}^{-1}$ suelo seco)			
	15 dds	30 dds	50 dds	75 dds	15 dds	30 dds	50 dds	75 dds
T1 (Control)	89,39 $\pm$ 4,56 <sup>a</sup>	77 $\pm$ 5,58 <sup>a</sup>	67,71 $\pm$ 0,53 <sup>a</sup>	85,9 $\pm$ 0,44 <sup>a</sup>	120,66 $\pm$ 4,12 <sup>a</sup>	67,87 $\pm$ 1,69 <sup>a</sup>	91,56 $\pm$ 3,1 <sup>a</sup>	77,25 $\pm$ 7,2 <sup>a</sup>
T2 (Químico)	81,11 $\pm$ 7,42 <sup>ab</sup>	64,11 $\pm$ 2,97 <sup>b</sup>	44,2 $\pm$ 1,43 <sup>b</sup>	76,42 $\pm$ 1,79 <sup>b</sup>	116,52 $\pm$ 6,83 <sup>a</sup>	90,87 $\pm$ 2,47 <sup>b</sup>	65,08 $\pm$ 1,59 <sup>b</sup>	115,33 $\pm$ 2,87 <sup>b</sup>
T3 (Enmienda verde)	64,03 $\pm$ 3,9 <sup>b</sup>	62,54 $\pm$ 0,6 <sup>b</sup>	54,06 $\pm$ 7,43 <sup>b</sup>	41,07 $\pm$ 3,61 <sup>c</sup>	63,23 $\pm$ 4,5 <sup>c</sup>	47,03 $\pm$ 11,87 <sup>c</sup>	89,18 $\pm$ 6,83 <sup>a</sup>	112,93 $\pm$ 13,7 <sup>b</sup>
T4 (Azufre elemental)	74,84 $\pm$ 3,79 <sup>ab</sup>	104,16 $\pm$ 1,59 <sup>c</sup>	31,9 $\pm$ 2,52 <sup>c</sup>	40,01 $\pm$ 5,18 <sup>c</sup>	82,1 $\pm$ 7,36 <sup>b</sup>	91,52 $\pm$ 9,89 <sup>b</sup>	38,89 $\pm$ 4 <sup>c</sup>	52,45 $\pm$ 4,33 <sup>c</sup>
T5 (Vermicompost)	71,89 $\pm$ 7,76 <sup>b</sup>	122,75 $\pm$ 1,65 <sup>d</sup>	66,67 $\pm$ 1,89 <sup>a</sup>	43,09 $\pm$ 1,6 <sup>c</sup>	93,02 $\pm$ 6,49 <sup>b</sup>	128,97 $\pm$ 4,41 <sup>d</sup>	64,65 $\pm$ 2,23 <sup>b</sup>	53,78 $\pm$ 3,2 <sup>c</sup>
T6 (E. verde +Azufre)	56,95 $\pm$ 9,65 <sup>bc</sup>	99,55 $\pm$ 5,28 <sup>c</sup>	22,73 $\pm$ 0,48 <sup>c</sup>	59,67 $\pm$ 0,99 <sup>d</sup>	124,59 $\pm$ 3,88 <sup>a</sup>	98,5 $\pm$ 2,96 <sup>b</sup>	74,15 $\pm$ 1,09 <sup>b</sup>	59,34 $\pm$ 3,58 <sup>cd</sup>
T7 (E. verde + Vermi.)	70,81 $\pm$ 7,22 <sup>b</sup>	68,47 $\pm$ 5,13 <sup>ab</sup>	73,52 $\pm$ 4,09 <sup>a</sup>	52,82 $\pm$ 3,3 <sup>cd</sup>	92,16 $\pm$ 7,56 <sup>b</sup>	67,46 $\pm$ 7,64 <sup>a</sup>	98,21 $\pm$ 3,78 <sup>a</sup>	82,98 $\pm$ 2,29 <sup>a</sup>
T8 (Vermi. + Azufre)	50,54 $\pm$ 3,38 <sup>bc</sup>	57 $\pm$ 3,02 <sup>b</sup>	22,54 $\pm$ 4,41 <sup>c</sup>	23,86 $\pm$ 0,74 <sup>a</sup>	66,64 $\pm$ 7,23 <sup>bc</sup>	41,69 $\pm$ 1,69 <sup>c</sup>	39,1 $\pm$ 7,05 <sup>c</sup>	70,58 $\pm$ 2,77 <sup>ad</sup>
T9 (E. verde + Vermi + Azufre)	65 $\pm$ 2,33 <sup>b</sup>	39,92 $\pm$ 6,59 <sup>e</sup>	17,89 $\pm$ 1,99 <sup>c</sup>	118,58 $\pm$ 6,29 <sup>f</sup>	81,35 $\pm$ 4,66 <sup>b</sup>	39,54 $\pm$ 5,05 <sup>c</sup>	27,71 $\pm$ 3,44 <sup>c</sup>	106,03 $\pm$ 2,21 <sup>b</sup>
Significancia efecto tratamientos	p<0,05				p<0,05			

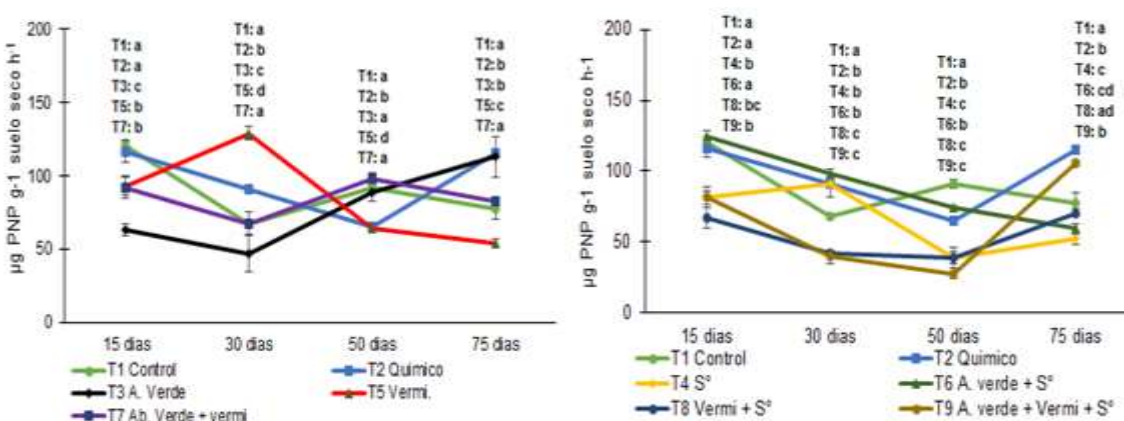
Los valores representan la media de n=3 con su respectivo error estándar. Para cada muestreo y parámetro, valores con letras diferentes presentan diferencias estadísticamente significativas (p<0,05) de acuerdo a la comparación de medias de Tukey.

Por otra parte la actividad fosfatasa alcalina también es afectado por la inmovilización del fósforo en la biomasa microbiana (Saha *et al.*, 2008). Lo anterior se observó para T9 en el día 75 (Fig. 7), donde la mayor actividad de la fosfatasa alcalina se presentó junto con la mayor BMC, lo cual pudo favorecer la inmovilización de fósforo en la biomasa microbiana por la incorporación de azufre elemental como fuente acidulante (Ye *et al.*, 2011)

En la evaluación de la fosfatasa acida se observó que los tratamientos orgánicos y T2 presentaron los mayores valores de actividad ( $>100 \mu\text{g PNP g}^{-1}$  suelo seco) a lo largo del experimento (Tabla 8), lo cual concuerda con lo mencionado por varios autores (Saha *et al.*, 2008; Nannipieri *et al.*, 2011; Spohn & Kuzyakov, 2013; Gianfreda, 2015) acerca del efecto positivo de aplicaciones de enmiendas orgánicas, nitrógeno y fertilizantes químicos sobre la actividad de la fosfato acida, contrario a lo que sucede en la fosfatasa alcalina, debido al aumento en conjunto de la disponibilidad de fósforo y nitrógeno

además de la capacidad de las plantas y ciertos grupos de microorganismos de solamente producir fosfatasa acida. Por el contrario los tratamientos en los que se utilizó azufre elemental presentaron los menores valores de actividad ( $<50 \mu\text{g PNP g}^{-1}$  suelo seco) (Tabla 8), debido tal vez al efecto inhibitorio del azufre elemental sobre ciertas comunidades de microorganismos (Gupta *et al.*, 1988; Wyszowska *et al.*, 2001).

En el presente estudio se observó que la actividad fosfatasa acida para los tratamientos en los que se utilizó  $\text{S}^0$  y/o vermicompost y T2, disminuyen su actividad en los días 30 y 50 (Fig. 8), lo cual puede corresponder a aumento de la disponibilidad de fósforo para las plantas, por el efecto acidulante del  $\text{S}^0$ , y disminución en la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos (Alvarez-Solis *et al.*, 2010), contrario a T1 y los tratamientos con presencia de enmienda verde (Fig. 8), los cuales tendieron a aumentar o mantener los valores de actividad en el mismo periodo de tiempo, probablemente por la menor disponibilidad de fósforo para las plantas y a la incorporación de nitrógeno orgánico (Nannipieri *et al.*, 2011) ya que la adición de fuentes de nitrógeno o abonos verdes de leguminosas permiten aumentar o mantener la producción de fosfatasa entre periodos de tiempo de muestreo (Inal & Gunes, 2008; Lemanowicz, 2011; Li *et al.*, 2016). De otro lado el estado fenológico de las plantas también puede alterar la actividad de la fosfatasa en la rizosfera debido a la capacidad de las plantas para producir fosfatasa acida (Li *et al.* 2016; Marschner *et al.*, 2007; Zeng *et al.*, 2005).



**Figura 8.** Fosfatasa acida de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

#### 4.2.2.2 Proteasa

Aplicaciones de enmiendas orgánicas en el suelo presentan generalmente efectos positivos sobre la actividad proteasa de suelos áridos, debido a la incorporación de compuestos orgánicos nitrogenados (Dinesh *et al.*, 2004; Lazcano & Domínguez, 2011). A pesar de lo anterior en el presente estudio se evidencio que los tratamientos en los que se aplicó enmiendas orgánicas, a excepción de T7, presentaron la mayor parte del experimento baja actividad proteasa ( $<10 \mu\text{g tyr g}^{-1} \text{ suelo seco } 2\text{h}^{-1}$ ) (Tabla 9), lo cual corresponde a lo encontrado por (Mukhopadhyay & Joy, 2010) en suelos cultivados con *Acacia auriculiformis* y *Shorea robusta* donde se propuso como causa de la baja actividad proteolítica del suelo a la mayor concentración de compuesto orgánicos poco nutritivos en forma de fenoles, lignina, polifenoles y taninos, los cuales disminuyen la actividad enzimática de los suelos; lo anterior podría corresponder con lo observado en los tratamientos en los que se utilizó enmienda verde de *P. juliflora* (Fig. 9), ya que al utilizar material vegetal de plantas que crecían en el suelo sódico, su contenido de polifenoles y compuestos antioxidantes como taninos y lignina puede ser alto (Trinsoutrot *et al.*, 2000; Meloni *et al.*, 2007; Singh *et al.*, 2014;) además que al someter esta enmienda a condiciones de pH ácido, como los tratamientos en los que se mezcló con  $\text{S}^{\circ}$ , el contenido de fenoles y polifenoles puede aumentar (Sarasvati *et al.*, 2014) por lo que podría inhibir ciertas poblaciones de microorganismos.

De otro lado el vermicompost al ser materia orgánica descompuesta por la acción de lombrices de tierra y microorganismos, la mayor parte del nitrógeno se encuentra en formas mineralizadas (Masciandaro *et al.*, 1997; Benitez *et al.*, 1999; Pattnaik & Reddy, 2010; Ali *et al.*, 2015) por lo que la actividad proteolítica puede verse inhibida en suelos, con limitaciones nutricionales, debido al efecto regulatorio que ejerce el  $\text{NH}_4^{+}$  sobre la actividad de las proteasas (Vranova *et al.*, 2013). De igual manera los tratamientos en los que se aplicó  $\text{S}^{\circ}$  presentaron tendencia a disminuir su actividad proteolíticas después del día 30 (Fig. 9), lo cual puede estar relacionado a reducción del pH en la rizosfera por la oxidación del  $\text{S}^{\circ}$ , conllevando a que disminuya la estabilidad de las proteasas alcalinas, principal grupo de proteasas producidas por los microorganismos que habitan suelos alcalinos y sódicos las cuales al someterse a pH por debajo de 7 disminuye su actividad, estabilidad y producción (Horikoshi, 1971; Ellaiah *et al.*, 2002; N. Jisha *et al.*, 2013).

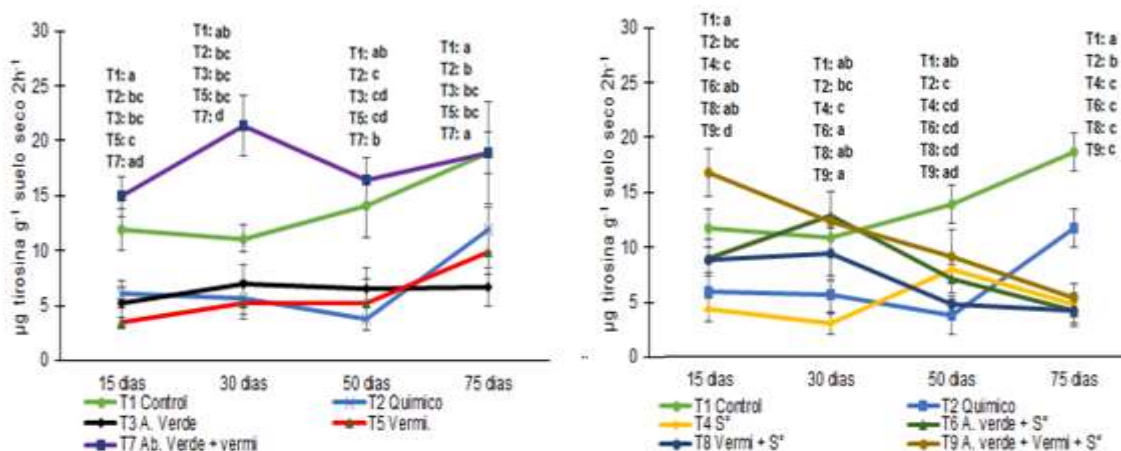
**Tabla 9.** Actividad proteasa de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

Tratamientos	Proteasa ( $\mu\text{g}$ tirosina $\text{g}^{-1}$ suelo seco $2\text{h}^{-1}$ )			
	15 dds	30 dds	50 dds	75 dds
T1 (Control)	11,91 $\pm$ 1,9 <sup>a</sup>	11,06 $\pm$ 1,23 <sup>ab</sup>	14,08 $\pm$ 2,82 <sup>ab</sup>	18,89 $\pm$ 1,87 <sup>a</sup>
T2 (Químico)	6,06 $\pm$ 1,28 <sup>bc</sup>	5,67 $\pm$ 1,49 <sup>bc</sup>	3,77 $\pm$ 1,07 <sup>c</sup>	11,92 $\pm$ 2,09 <sup>b</sup>
T3 (Enmienda verde)	5,26 $\pm$ 1,39 <sup>bc</sup>	6,96 $\pm$ 1,76 <sup>bc</sup>	6,56 $\pm$ 1,82 <sup>cd</sup>	6,66 $\pm$ 1,72 <sup>bc</sup>
T4 (Azufre elemental)	4,36 $\pm$ 0,89 <sup>c</sup>	3,09 $\pm$ 0,9 <sup>c</sup>	8,06 $\pm$ 1,92 <sup>cd</sup>	4,77 $\pm$ 1,52 <sup>c</sup>
T5 (Vermicompost)	3,47 $\pm$ 0,64 <sup>c</sup>	5,19 $\pm$ 1,41 <sup>bc</sup>	5,26 $\pm$ 1,53 <sup>cd</sup>	9,9 $\pm$ 2,08 <sup>bc</sup>
T6 (E. verde +Azufre)	9,13 $\pm$ 1,71 <sup>ab</sup>	13,04 $\pm$ 2,2 <sup>a</sup>	7,18 $\pm$ 1,35 <sup>cd</sup>	4,18 $\pm$ 1,37 <sup>c</sup>
T7 (E. verde + Vermi.)	14,91 $\pm$ 1,78 <sup>ad</sup>	21,4 $\pm$ 2,79 <sup>d</sup>	16,38 $\pm$ 2,14 <sup>b</sup>	18,94 $\pm$ 4,62 <sup>a</sup>
T8 (Vermi. + Azufre)	8,95 $\pm$ 1,13 <sup>ab</sup>	9,47 $\pm$ 2,38 <sup>ab</sup>	4,88 $\pm$ 0,35 <sup>cd</sup>	4,27 $\pm$ 1,24 <sup>c</sup>
T9 (E. verde + Vermi + Azufre)	17,01 $\pm$ 2,22 <sup>d</sup>	12,41 $\pm$ 2,9 <sup>a</sup>	9,25 $\pm$ 2,45 <sup>ad</sup>	5,46 $\pm$ 1,28 <sup>c</sup>
Significancia efecto tratamientos	P<0,05			

Los valores representan la media de n=3 con su respectivo error estándar. Para cada muestreo y parámetro, valores con letras diferentes presentan diferencias estadísticamente significativas ( $p<0,05$ ) de acuerdo a la comparación de medias de Tukey.

Es de mencionar que T1 y T7 fueron los únicos tratamientos que presentaron tendencia a aumentar con el tiempo la actividad proteolítica (Fig. 9), lo cual puede corresponder al aumento en la disponibilidad de sustrato para las proteasas proveniente de las raíces y material vegetal del cultivo de maíz. Donde además para T7, tratamiento correspondiente a la mayor cantidad de materia orgánica aplicada sin S°, la mezcla de las dos enmiendas orgánicas pudo aumentar la concentración de compuestos recalcitrantes, lo cual se ha demostrado que poseen efecto positivo en la actividad proteasa de suelos enmendados con fuentes proteicas de origen vegetal (Geisseler & Horwath, 2009).





**Figura 9.** Actividad proteasa de un suelo sódico tipo haplustepts con cultivo de *Zea mayz* tratado con abonos verdes, enmiendas orgánicas y minerales en el Copey-Cesar. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ Intervalo de confianza al 95%) de cada uno de los tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey,  $p < 0,05$ ).

#### 4.2.2.3 Actividad hidrolítica general

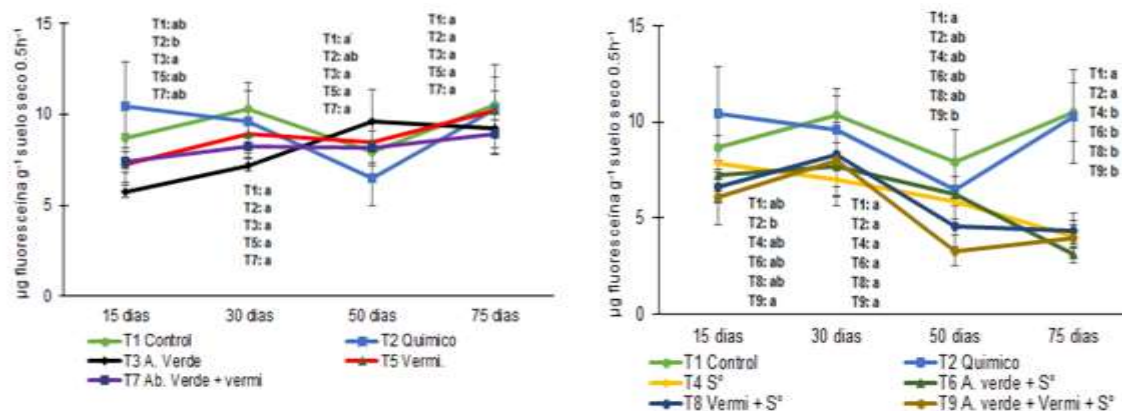
De forma en general se observó que T1 y T2 presentaron la mayor actividad hidrolítica en el tiempo al presentar valores mayores a 7 µg fluoreseina g<sup>-1</sup> suelo seco 0.5h<sup>-1</sup>, contrario a los tratamientos T4, T6, T8 y T9 (Tabla 10), en los que se aplicó S<sup>0</sup>, que presentaron tendencia a disminuir su actividad hidrolítica después del día 30 a valores menores a 5 µg fluoreseina g<sup>-1</sup> suelo seco 0.5h<sup>-1</sup> (Fig. 10), mientras que los tratamientos orgánicos tienden a aumentar su actividad con el tiempo a valores cercanos a T1 y T2. La mayor actividad en T1 y T2 (Fig. 10), y disminución de la actividad hidrolítica en los tratamientos con S<sup>0</sup> T4, T6, T8 y T9, probablemente se deba al pH alcalino a neutro presentado en la rizosfera de T1 y T2 a través. Mientras que las aplicaciones de S<sup>0</sup> pudieron disminuir el pH de la rizosfera hasta valores cercanos a 5,5.

**Tabla 10.** Actividad hidrolítica general (FDA) de un suelo sódico cultivado con *Zea mayz* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

Tratamientos	FDA ( $\mu\text{g fluoresceína g}^{-1}$ suelo seco $0.5\text{h}^{-1}$ )			
	15 dds	30 dds	50 dds	75 dds
T1 (Control)	8,69 $\pm$ 1,89 <sup>ab</sup>	10,33 $\pm$ 1,41 <sup>a</sup>	7,95 $\pm$ 1,63 <sup>a</sup>	10,51 $\pm$ 1,53 <sup>a</sup>
T2 (Químico)	10,42 $\pm$ 2,45 <sup>b</sup>	9,59 $\pm$ 1,72 <sup>a</sup>	6,48 $\pm$ 1,5 <sup>ab</sup>	10,3 $\pm$ 2,45 <sup>a</sup>
T3 (Enmienda verde)	5,76 $\pm$ 0,33 <sup>a</sup>	7,21 $\pm$ 0,37 <sup>a</sup>	9,62 $\pm$ 1,72 <sup>a</sup>	9,23 $\pm$ 1,41 <sup>a</sup>
T4 (Azufre elemental)	7,82 $\pm$ 1,46 <sup>ab</sup>	7,02 $\pm$ 1,4 <sup>a</sup>	5,86 $\pm$ 1,28 <sup>ab</sup>	4,02 $\pm$ 0,59 <sup>b</sup>
T5 (Vermicompost)	7,23 $\pm$ 0,94 <sup>ab</sup>	8,92 $\pm$ 1,33 <sup>a</sup>	8,44 $\pm$ 1,24 <sup>a</sup>	10,25 $\pm$ 1,02 <sup>a</sup>
T6 (E. verde +Azufre)	7,2 $\pm$ 1,32 <sup>ab</sup>	7,72 $\pm$ 1,67 <sup>a</sup>	6,22 $\pm$ 1,52 <sup>ab</sup>	3,15 $\pm$ 0,52 <sup>b</sup>
T7 (E. verde + Vermi.)	7,4 $\pm$ 1,57 <sup>ab</sup>	8,23 $\pm$ 0,63 <sup>a</sup>	8,21 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>	8,92 $\pm$ 0,75 <sup>a</sup>
T8 (Vermi. + Azufre)	6,6 $\pm$ 0,79 <sup>ab</sup>	8,32 $\pm$ 1,68 <sup>a</sup>	4,55 $\pm$ 1,08 <sup>ab</sup>	4,36 $\pm$ 0,88 <sup>b</sup>
T9 (E. verde + Vermi + Azufre)	6,08 $\pm$ 1,42 <sup>a</sup>	7,96 $\pm$ 1,77 <sup>a</sup>	3,27 $\pm$ 0,8 <sup>b</sup>	3,95 $\pm$ 0,94 <sup>b</sup>
Significancia efecto tratamientos	P<0,05			

Los valores representan la media de n=3 con su respectivo error estándar. Para cada muestreo y parámetro, valores con letras diferentes presentan diferencias estadísticamente significativas ( $p<0,05$ ) de acuerdo a la comparación de medias de Tukey.

Se ha reportado que aplicaciones de enmiendas orgánicas e inóculos microbianos presentan aumentos significativos de la actividad hidrolítica del suelo (Stark *et al.*, 2008; Arriagada *et al.*, 2009; Cubillos-Hinojosa *et al.*, 2015; Silva Carvalho *et al.*, 2015), lo cual no pudo ser observado en el transcurso del ensayo. Lo anterior pudo deberse a que las enmiendas orgánicas utilizadas presentan baja concentración de sustrato a corto tiempo (Fig. 10), dado que el Vermicompost corresponde a materia orgánica estabilizada con alto contenido de compuestos recalcitrantes mientras que la enmienda verde de *P. juliflora* puede poseer compuestos fenólicos que inhiben a corto tiempo el crecimiento de ciertos grupos microbianos, por tal motivo la tendencia a aumentar con el tiempo de la actividad hidrolítica en T3, T5 y T7 (Fig. 10), puede deberse a aumento de la disponibilidad de sustratos a causa de la degradación de compuestos recalcitrantes, como ligninas y celulosas, que permiten el aumento de la concentración de compuestos orgánicos solubles y la actividad heterotrófica en el suelo por la baja disponibilidad de compuestos orgánicos solubles (Fontaine *et al.*, 2003; Tian & Shi, 2014)



**Figura 10.** Actividad hidrolítica general (FDA) de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

### 4.3 Efecto de enmiendas orgánicas y azufre elemental sobre las variables de desarrollo del cultivo maíz

Se encontró que todas las variables de desarrollo mostraron respuesta a los tratamientos, donde las aplicaciones de  $S^0$  mezclado con enmiendas orgánicas fueron los tratamientos que presentaron los mayores porcentajes de respuesta (Fig. 11), hallándose para la variable longitud aumento hasta del 42,3%, para el peso fresco de la planta 46,8% y por último para el diámetro de tallo 13,4% con respecto al control (Tabla 11).

En suelos afectados por sales la presencia de iones en altas concentraciones y pH alcalinos, son los principales factores que dificultan el establecimiento y crecimiento de los cultivos en estos suelos (Fageria *et al.*, 2011; Karimizarchi *et al.*, 2014) por lo que generalmente se cultivan plantas resistentes a tales condiciones. A pesar que el maíz es un cultivo moderadamente sensitivo al estrés por sales, esta presenta ciertas estrategias fisiológicas que le permiten crecer en condiciones sódicas a costas de reducir su desarrollo y producción, debido que las principales estrategias reconocidas para este cultivo producción de antioxidantes, regulación estomatal y ajustes osmóticos y exclusión vacuolar de los iones tóxicos (Dias *et al.*, 2004; Farooq *et al.*, 2015) requieren de gasto energético. Dado lo anterior varios estudios han demostrado que al reducir la concentración de sodio y el pH del suelo en suelos cultivados con maíz, se aumenta el

desarrollo y producción de las plantas (Karimizarchi *et al.*, 2014), debido a la reducción de las condiciones de estrés y aumento en la disponibilidad de nutrientes.

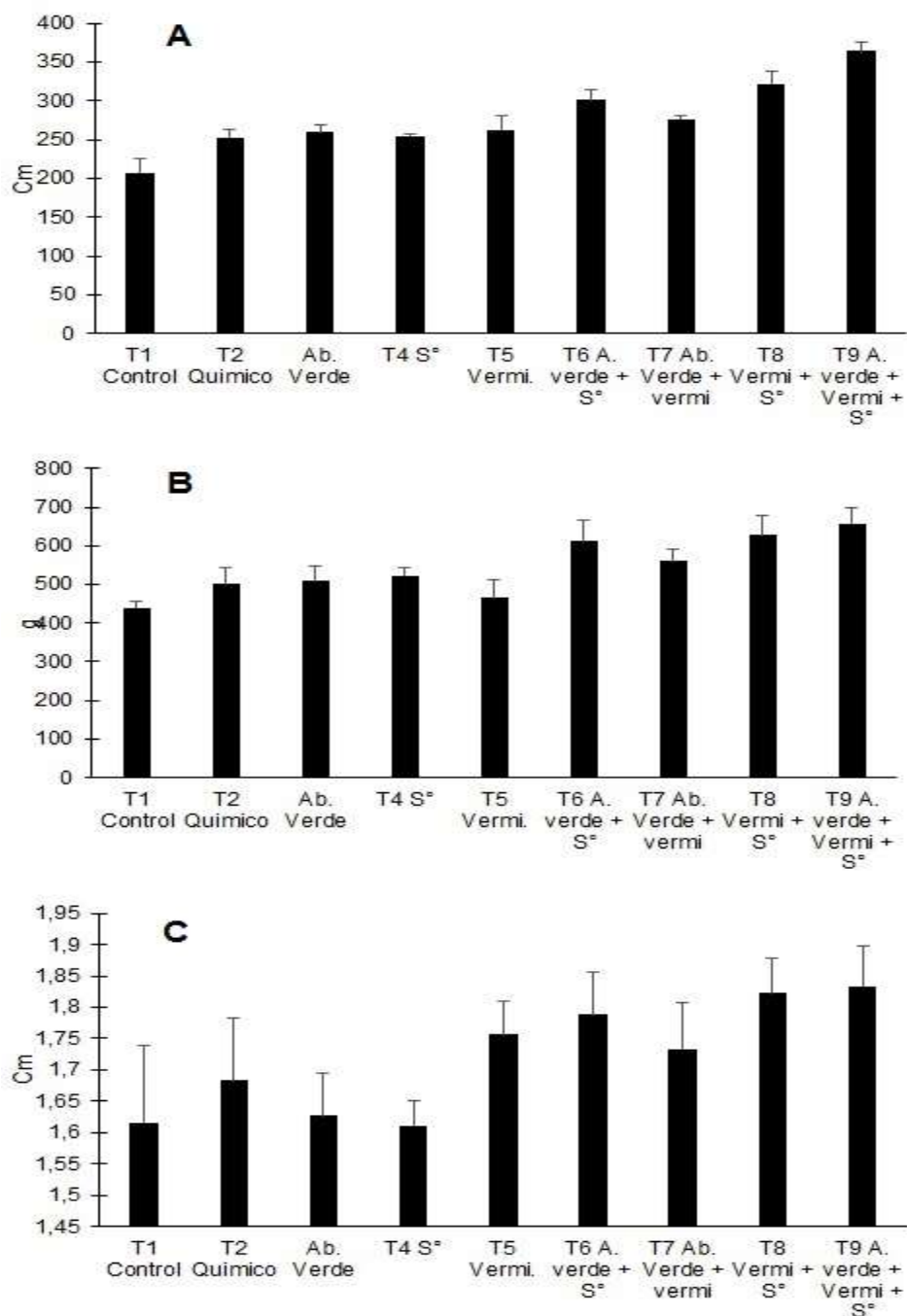
**Tabla 11.** Variables de desarrollo del cultivo de maíz de un suelo sódico tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

Tratamientos	Longitud (Cm)	Peso (g)	Diámetro (Cm)
T1 (Control)	207,67 $\pm$ 18,72 <sup>a</sup>	438,89 $\pm$ 16,56 <sup>ab</sup>	1,62 $\pm$ 0,12 <sup>a</sup>
T2 (Químico)	252,67 $\pm$ 9,67 <sup>b</sup>	500 $\pm$ 44,73 <sup>ab</sup>	1,68 $\pm$ 0,1 <sup>ab</sup>
T3 (Enmienda verde)	260 $\pm$ 9,91 <sup>b</sup>	508,33 $\pm$ 39,17 <sup>ab</sup>	1,63 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup>
T4 (Azufre elemental)	254,67 $\pm$ 1,97 <sup>b</sup>	522,22 $\pm$ 20,73 <sup>ab</sup>	1,61 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>
T5 (Vermicompost)	262,67 $\pm$ 18,69 <sup>b</sup>	464,44 $\pm$ 47,21 <sup>a</sup>	1,76 $\pm$ 0,05 <sup>ab</sup>
T6 (E. verde + Azufre)	301 $\pm$ 12,96 <sup>c</sup>	611,11 $\pm$ 56,05 <sup>c</sup>	1,79 $\pm$ 0,07 <sup>b</sup>
T7 (E. verde + Vermi.)	276,33 $\pm$ 4,6 <sup>bc</sup>	561,11 $\pm$ 30,68 <sup>bc</sup>	1,73 $\pm$ 0,07 <sup>ab</sup>
T8 (Vermi. + Azufre)	322,33 $\pm$ 16,03 <sup>cd</sup>	627,78 $\pm$ 50,64 <sup>c</sup>	1,82 $\pm$ 0,06 <sup>b</sup>
T9 (E. verde + Vermi + Azufre)	364,33 $\pm$ 11,71 <sup>d</sup>	658,33 $\pm$ 43,21 <sup>c</sup>	1,83 $\pm$ 0,06 <sup>b</sup>
<b>Significación</b>	*	*	*

NS, no significativo; \*, significativo a  $p < 0,05$  obtenida por ANOVA.

Se encontró la mayor respuesta en el desarrollo de las plantas de maíz en los tratamientos de mezcla S° con materia orgánica (Fig. 11), similar a lo observado por Karimizarchi *et al.* (2014) en plantas de maíz cultivadas en un suelo alcalino con varias dosis de S°, encontrando que aquellos tratamientos donde la oxidación del azufre fue mayor la biomasa seca de las plantas de maíz aumento hasta un 45,06%, acompañado además de aumento en la concentración de micronutrientes.

Por otro lado los tratamientos basados solo en enmiendas orgánicas no aumentaron de forma significativa ( $p < 0,05$ ) los parámetros de crecimiento del maíz (Tabla 11), lo cual puede deberse a que las cantidades aplicadas de ambas enmiendas no fueron las suficientes como para disminuir las condiciones de estrés sódico y/o aumentar la disponibilidad de nutrientes, ambas condiciones limitantes para el desarrollo de las plantas en estos suelos.



**Figura 11.** Variables de desarrollo del cultivo de maíz de un suelo sódico tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *P. juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. A) Longitud plantas B) Peso plantas C) Diámetro tallo plantas. Los valores presentados corresponden a la media ( $\pm$ error estándar) de cada uno de los tratamientos.

## **4.4 Correlaciones entre las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo sodico y las variables de desarrollo del maíz**

En el anexo E se observan las correlaciones entre las propiedades biológicas y fisicoquímicas con las variables de desarrollo del cultivo de maíz evaluadas. Éstas permitieron establecer la relación que se presentó entre el efecto que tuvo el empleo de las dos enmiendas orgánicas y el S° en el suelo y el cultivo.

### **4.4.1 Propiedades fisicoquímicas**

Teniendo en cuenta las correlaciones que se presentaron con las variables de desarrollo longitud y peso fresco, de acuerdo a lo observado en el anexo E estas variables presentaron correlaciones positivas y significativas con las propiedades químicas del suelo CE,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y CICE, estas se pueden deber a la relación que las propiedades anteriores tienen en general con la reducción de las características sódicas del suelo, como se ha mencionado en el numeral 4.1 de este trabajo. Debido que en suelos sódicos, la interferencia del sodio en la absorción y transporte de cationes constituye el principal problema nutricional en el cultivo de maíz (Farooq *et al.*, 2015), el aumento en la disponibilidad de cationes y la capacidad de intercambio catiónico del suelo contribuyen a disminuir el efecto toxico del sodio, lo cual se ve reflejado en mayor altura y ganancias de biomasa por parte de las plantas, el anterior resultado concuerda con lo observado por Oo *et al.* (2013) en plantas de maíz cultivadas en suelos salinos manejados con enmiendas orgánicas, donde los mayores valores de longitud de tallo y peso fresco de las plantas se encontraron en los tratamientos donde la CIC y la concentración de cationes aumentaron.

De otro lado las variables longitud y peso fresco, presentaron correlación negativa con las propiedades fisicoquímicas pH, RAS y PSI, variables que son asociadas a las condiciones sódicas del suelo. Dicha correlación negativa ha sido reportada por varios autores (Nordquist *et al.*, 1992; Karizimarchi *et al.*, 2014; Farooq *et al.*, 2015) los cuales plantean que pH alcalinos conllevan a la disminución de nutrientes, en especial los micronutrientes, además que en presencia de valores altos de RAS y PSI, llevan desbalances nutricionales de los macronutrientes, por tal motivo la reducción de los anteriores parámetros químicos generalmente conlleva al aumento en la productividad y desarrollo del cultivo de maíz en suelos sódicos manejados con enmiendas.

#### 4.4.2 Propiedades biológicas

En cuanto a la correlaciones entre las variables de desarrollo y las propiedades biológicas evaluadas, según lo observado en el anexo E, solamente la biomasa microbiana del suelo presento correlación positiva con las variables.

La correlación entre la BMC y el desarrollo del cultivo de maíz, se debe a que esta propiedad biológica está relacionada con las condiciones de estrés de los microorganismos, donde altos valores de BMC se relacionan con condiciones adecuadas para el desarrollo de los microorganismos. Teniendo en cuenta lo anterior Oo *et al.* (2013) encontró que en suelos salinos cultivados con maíz el aumento de la BMC junto con las variables de desarrollo altura y biomasa, se debe a la capacidad de los microorganismos de mejorar las propiedades fisicoquímicas y disponibilidad de nutrientes en los suelos salinos cuando las condiciones de estrés se ven reducidas.

De otro lado la actividad proteasa y FDA presentaron correlacion negativa con las variables de desarrollo. Lo cual puede deberse a que estas actividades enzimáticas están relacionadas a altos valores de pH, RAS y PSI, tal como se comentó en el numeral





## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

- La aplicación de enmienda verde *P. juliflora* afectó las propiedades químicas relacionadas a sodicidad del suelo, concentración de sodio en solución y RAS, al presentar valores por debajo del control.
- La aplicación de Vermicompost afectó las propiedades químicas relacionadas a sodicidad del suelo, concentración de sodio en solución y RAS, al presentar valores por debajo del control.
- Aplicaciones de S° afectaron positivamente las propiedades químicas evaluadas (pH, CE, Ca, Mg, Na) al presentar valores mayores que el control, mientras que propiedades (RAS y PSI) presentaron menores valores al final del experimento, esto indica que gran parte del S° aplicado en el suelo fue oxidado.
- Aplicaciones de mezclas de azufre y enmiendas orgánicas, presentaron mayores efectos sobre las propiedades químicas evaluadas (pH, CE, Ca, Mg, Na y CICE) y aquellas relacionadas con la sodicidad del suelo (RAS y PSI), debido al efecto positivo de la aplicación de enmiendas orgánicas sobre la oxidación del S°.
- Aplicaciones de enmiendas orgánicas y azufre elemental no tuvieron efectos significativos sobre la estabilidad del suelo al final del experimento.
- Ambas enmiendas orgánicas aumentan de forma significativa la BMC y RMS, lo cual indica que las poblaciones microbianas incrementan su metabolismo.
- Aplicaciones de S° y mezclado con enmiendas orgánicas aumentan significativamente la BMS pero no afectan la RMS, lo cual se puede relacionar con la disminución de las condiciones de sodicidad del suelo.
- Ambas enmiendas orgánicas disminuyen de forma significativa la actividad fosfatasa alcalina, presentándose los menores valores en el tratamiento de vermicompost, lo cual se debe a que esta enzima es regulada por el pH del suelo.

- Aplicaciones de enmiendas orgánicas con alta concentración de N como la enmienda verde de *P. juliflora*, aumentan de forma significativa la actividad fosfatasa acida en el transcurso del tiempo de experimento.
- Aplicaciones de enmiendas orgánicas estabilizadas como el vermicompost disminuyen la actividad fosfatasa acida en el transcurso del tiempo de experimento.
- Aplicaciones de ambas enmiendas orgánicas disminuyen de forma significativa la actividad FDA y proteasa, debido a la reducción del pH.
- Aplicaciones de S° y mezclado con enmiendas orgánicas disminuyo significativamente la actividad enzimática de las fosfatasas, proteasa y FDA, ya sea directamente por inhibición de microorganismos o indirectamente por alteración de las condiciones químicas del suelo.
- Aplicaciones de mezcla de las enmiendas orgánicas presentaron diferencias significativas en las variables de desarrollo de cultivo diámetro, longitud y peso de plantas.
- Aplicaciones de mezcla S° y enmiendas orgánicas presentaron diferencias significativas en las variables de desarrollo de cultivo diámetro, longitud y peso de plantas.
- Dado el carácter exploratorio del presente estudio y los resultados obtenidos se sugiere utilizar como enmienda para el manejo de suelos sódicos de la región caribe según, de acuerdo a la disponibilidad local y de recursos, mezcla de azufre elemental y enmienda verde de *P. juliflora* para agricultores de bajo recursos que no cuenten con el tiempo e inversión necesaria para el diseño de cría de lombrices de tierra; y mezcla azufre elemental y vermicompost, para agricultores que cuenten con los recursos para el establecimiento de cría de lombrices.

## 5.2 Recomendaciones

- Con el interés de profundizar en los resultados obtenidos en el presente ensayo, se sugiere llevar este tipo de estudios, durante varios ciclos productivos consecutivos, con el fin de percibir mejor su efecto sobre la estructuración, porosidad, densidad, carbono orgánico y CIC del suelo.
- Realizar evaluaciones de las poblaciones microbianas cultivables del suelo con relación a un mayor tiempo desde la adición de las enmiendas, con el fin de correlacionar su dinámica poblacional con la actividad enzimática del suelo.
- Se sugiere determinar el contenido de sodio de todas las enmiendas utilizadas



## Anexo A. Descripción del suelo sódico

CALICATA

Fecha: 29 septiembre 2015

**Perfil No:** P1.

**Tipo de perfil:** modal

**Taxonomía:** Typic Haplustepts, familia franca, superactiva e isohipertérmica.

**Unidad cartográfica:** Consociación Mojabobos

**Símbolo:** MB

**Localización geográfica:** Departamento: Cesar  
Municipio: El Copey  
Sitio: Mojabobos

**Coordenadas:** 105.718N; 740.380W

**Paisaje:** planicie aluvial

**Tipo de relieve:** plano de inundación de río meándrico

**Forma del terreno:** Plano de terraza

**Material parental:** aluviones medios

**Grado de alteración:** medio

**Clase de pendiente:** a nivel

**Grado de la pendiente:** 0-1%.

**Longitud:** muy larga

**Forma:** rectilínea

**Temperatura promedio anual:** 28°C

**Clima edáfico:** ústico, isohipertérmico

**Clase, tipo y grado de erosión:** no presenta

**Evidencias de erosión:** no presenta

**Tipo y clase de pedregosidad superficial:** no hay

**Drenaje interno:** medio

**Drenaje externo:** lento

**Drenaje natural:** bueno

**Nivel freático:** no se encontró

**Frecuencia y duración de las inundaciones:** no se presentan

**Frecuencia y duración de los encharcamientos:** muy cortos y localizados

**Profundidad efectiva:** muy profunda

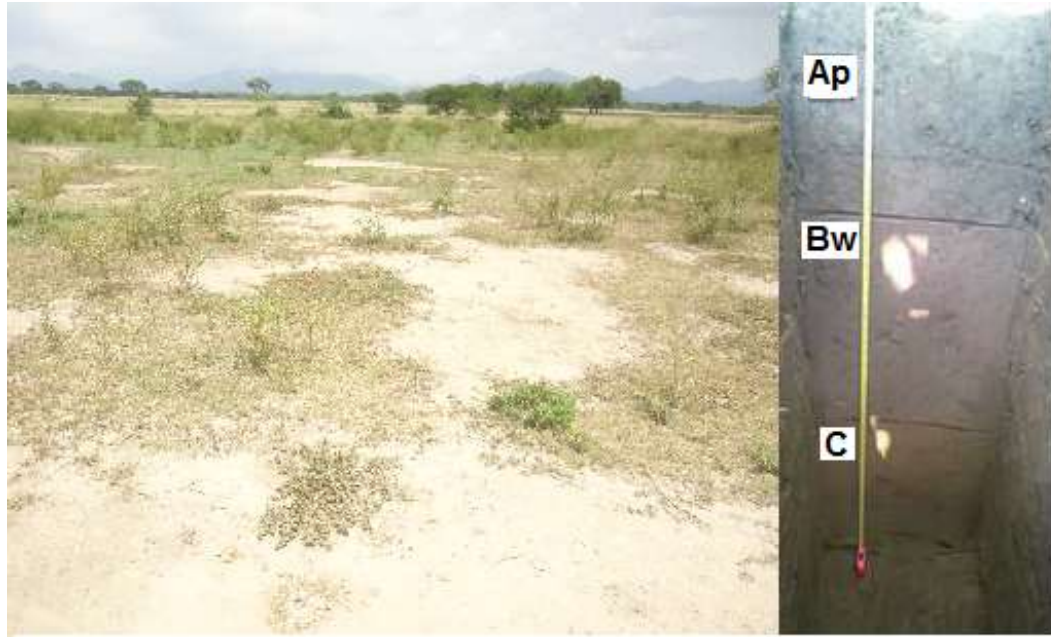
**Uso actual:** pasto estrella y ganadería semi intensiva

**Limitantes del uso:** presencia de sales y sodio por sectores

**Horizontes diagnósticos:** Epipedón úmbrico y endopedóncámbico

**Clases de características diagnósticas:** regímenes de humedad ústico y de temperatura isohipertérmico.

<b>0-32 cm</b>	Color en húmedo pardo oliva oscuro (2.5Y3/3); clase textural franco; estructura en bloques subangulares, fina y media, moderada;
<b>Ap</b>	consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; frecuentes raíces muy finas, finas y medias, vivas, de distribución normal, localizadas dentro y fuera de los pedos; poca actividad de macroorganismos; límite gradual y topografía plana; pH: 7,9 (moderadamente alcalino).
<b>32-75 cm</b>	Color en húmedo pardo oliva (2.5Y4/3); clase textural franco arcillo arenoso; estructura en bloques subangulares, media, moderada;
<b>Bw</b>	consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; pocas raíces muy finas y finas, vivas, de distribución normal, localizadas dentro y fuera de los pedos; no hay actividad de macroorganismos; límite gradual y topografía plana; pH: 9,2 (muy fuertemente alcalino).
<b>75-120 cm</b>	Color en húmedo pardo oliva (2.5Y4/4); clase textural franco arcilloso; sin estructura (suelta); consistencia en húmedo suelta, en mojado no pegajosa y no plástica; no hay raíces; no hay actividad de
<b>C</b>	macroorganismos; pH: 9,6 (muy fuertemente alcalino).



**Figura 10.** Perfil del suelo Typic Haplustepts





## Anexo B. Resultados del análisis granulométrico del suelo Typic Haplustepts

Horizonte/Profundidad (cm)	Granulometría			Clase textural	pH	*CaCO <sub>3</sub> cualitativo	Materia orgánica C.O %	Complejo de cambio (cmol(+)/kg)					
	Arena %	Limo %	Arcilla %					CIC	Ca	Mg	K	Na	BT
Ap 0-32	48,3	32,4	19,3	F	7,9		0,72	10,3	4,2	2	1,3	2,3	9,8
Bw 32-75	52,4	24,3	23,3	FArA	9,2	++	0,13	9	8,2	2,2	1	9	20,4
C 75-120	40,1	32,5	27,4	FAr	9,6	++	0,05	11,2	4,3	2	0,66	15,2	22,2

\* Niveles CaCO<sub>3</sub>: (+) = Bajo; (++) = Medio; (+++) = Alto; (+++++) = Muy alto; (-) = No presente; \*meq Calcio/100g (cmol(+)/kg) x 200 = mg/kg. ; \*meq Potasio/100g (cmol(+)/kg) x 391 = mg/kg. ; \*meq magnesio/100g (cmol(+)/kg) x 120 = mg/Kg. ; \*meq sodio/100g (cmol(+)/kg) x 230 = mg/kg. : Porcentaje (%) = mg/kg / 10.000 A = Arena; L = Limo; Ar = Arcilla; F = Franco; B.T. = Bases totales

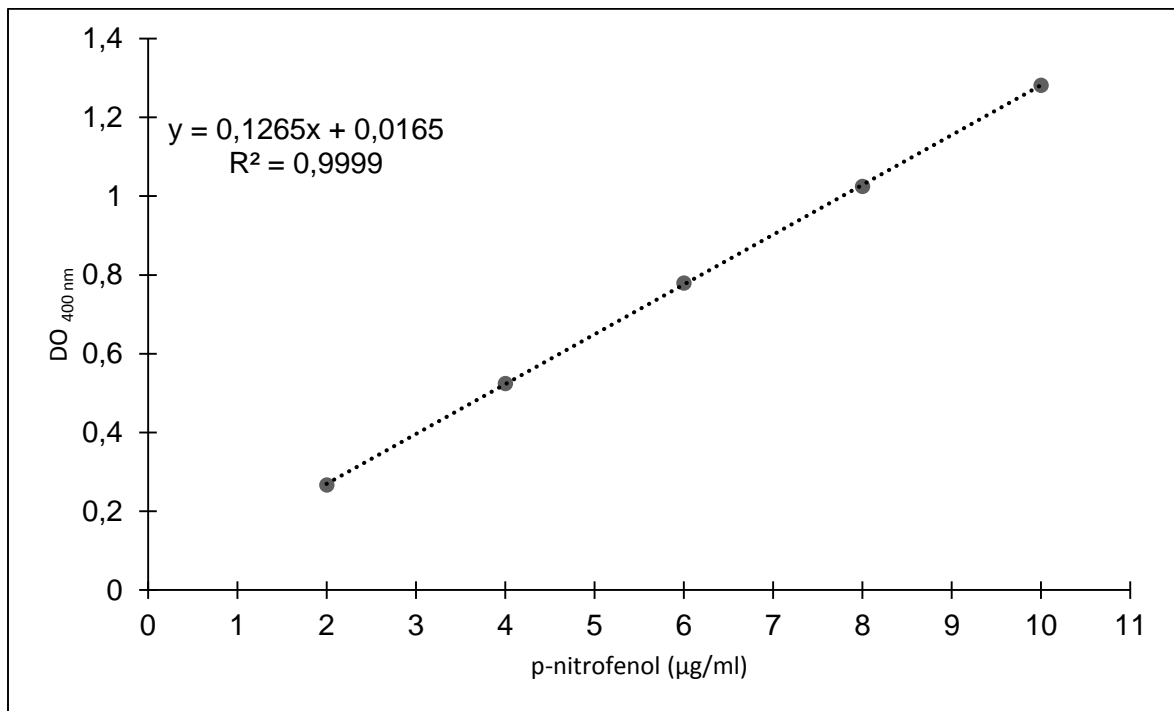
## Anexo C. Resultados del análisis químico en pasta de saturación del suelo Typic Haplustepts

Horizonte/Profundidad (cm)	Pa (%)	CE (dSm)	RAS	PSI	CLASE	Cationes mmol (+)/L				
						Ca	Mg	K	Na	Suma
Ap 0-32	34,8	2,357	9,87	17,09	Na	2,5	2,5	2,9	15,6	23,5
Bw 32-75	39,7	2,824	32,75	88,4	Na	0,86	0,41	0,525	26,2	28
C 75-120	55	2,813	23,27	96,7	Na	2,24	0,06	0,4	24,9	27,6

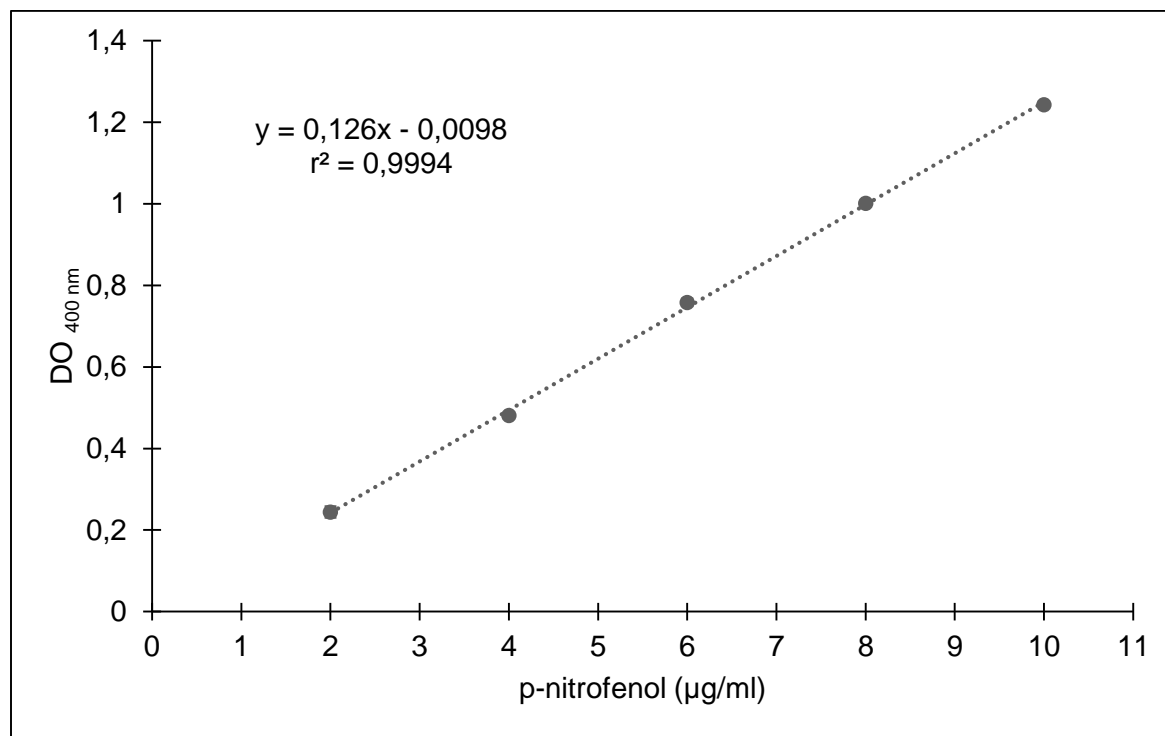
Aniones mmol (-)/L			cmol(+)/Kg		
Sulfatos	cloruros	Bicarbonatos	suma	CIC	Sodio
0,63	1,91	22,56	25,1	10,3	1,76
18,67	0,62	5,64	24,9	9	7,96
18,97	0,65	5,46	25,08	11,2	10,83

\* Pa: Porcentaje saturación de agua; \*Ras: Relación adsorción de sodio; \*CE: Conductividad eléctrica (dS/m); \*PSI: Porcentaje de saturación de sodio; \*CIC: Capacidad de intercambio catiónico; \*Na: Sódico (PSI>15) \*N: Normal.

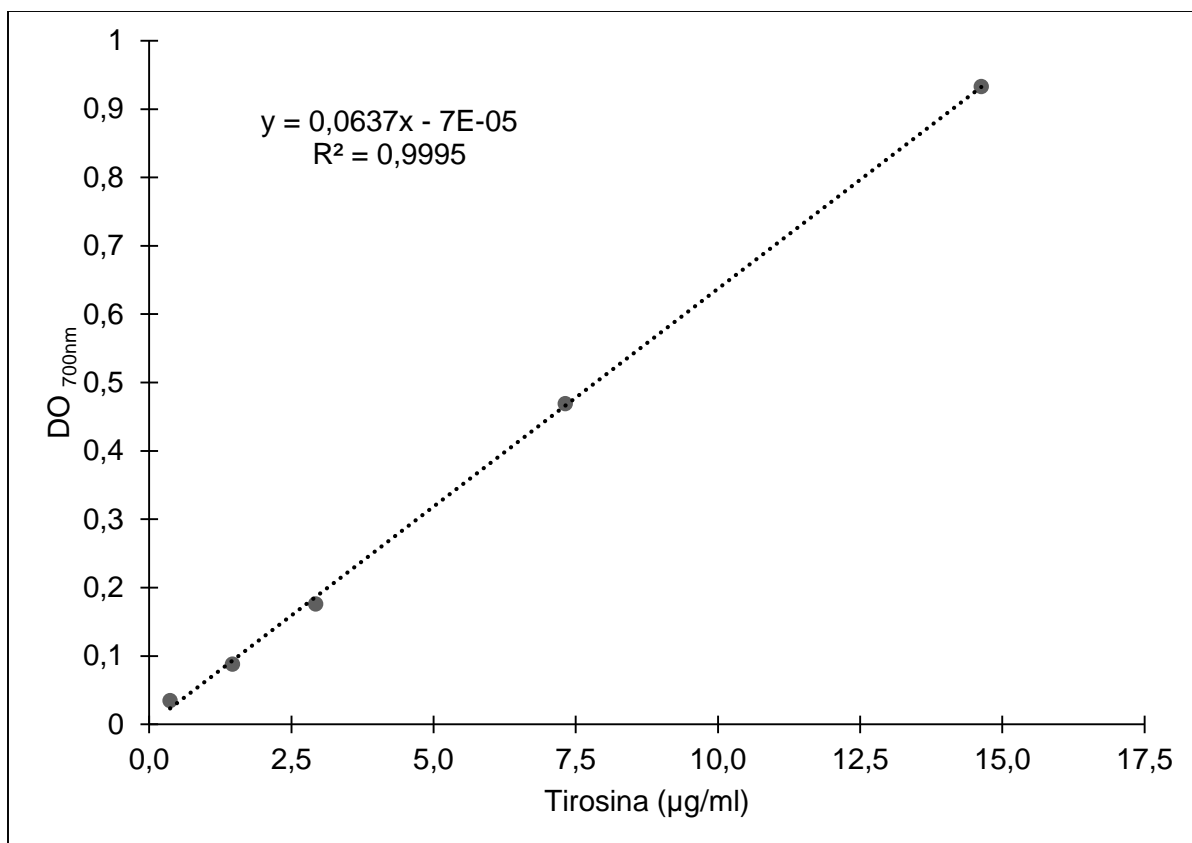
## Anexo D. Curvas de calibración de las actividades enzimáticas evaluadas en suelo



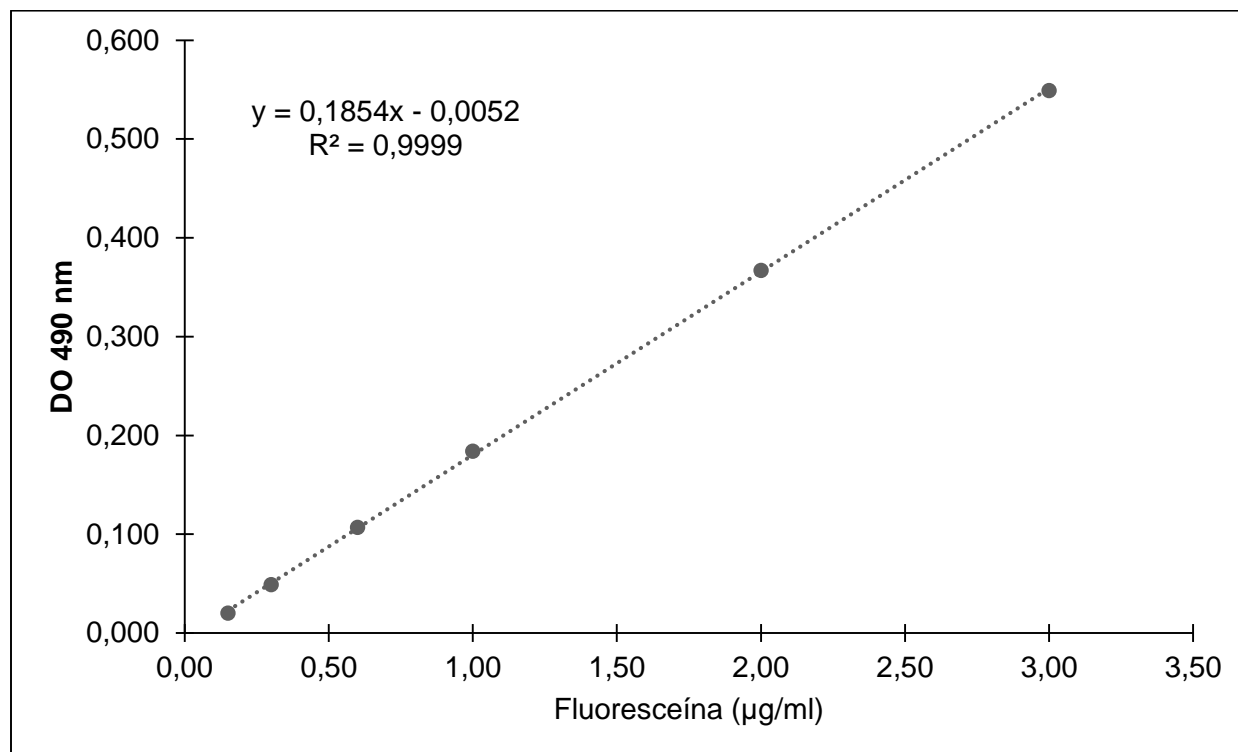
Curva de calibración fosfatasa alcalina. Cada punto representa la media de  $n=3$ .



Curva de calibración fosfatasa ácida. Cada punto representa la media de  $n=3$ .



Curva de calibración proteasa. Cada punto representa la media de n=3



Curva de calibración FDA. Cada punto representa la media de n=3

## Anexo E. Curvas de calibración de las actividades enzimáticas evaluadas en suelo

Coeficientes de correlación de Pearson con su respectiva significancia ( $p$ ) para variables de desarrollo del maíz y las propiedades fisicoquímicas y biológicas de un suelo sódico cultivado con maíz, en el día 75 del ensayo, tratado con dos enmiendas orgánicas y azufre elemental

	Protea	FDA	F.alcali	F.acida	BMC	RMS	PH	CE	Ca	Mg	Na	RAS	%CO	CICE	DGM	DPM	PSI	Diámetro	Peso	Longit
Proteasa	1	<b>.728**</b>	,205	,131	<b>-.568**</b>	-,032	<b>.735**</b>	<b>-.715**</b>	-,484*	<b>-.681**</b>	-,299	<b>.623**</b>	,072	-,513**	,044	-,241	,554**	-,307	-,526**	-,540**
		<b>,000</b>	,304	,516	<b>,002</b>	,873	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,010	<b>,000</b>	,130	<b>,001</b>	,720	,006	,826	,226	,003	,119	,005	,004
FDA	<b>.728**</b>	1	,017	,308	<b>-.811**</b>	<b>.400*</b>	<b>.856**</b>	<b>-.911**</b>	<b>-.850**</b>	<b>-.886**</b>	<b>-.539**</b>	<b>.672**</b>	-,328	<b>-.745**</b>	-,079	-,138	<b>.758**</b>	-,373	<b>-.747**</b>	<b>-.669**</b>
	<b>,000</b>		,932	,118	<b>,000</b>	<b>,039</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,004</b>	<b>,000</b>	,095	<b>,000</b>	,695	,491	<b>,000</b>	,055	<b>,000</b>	<b>,000</b>
F.alcalina	,205	,017	1	,458*	,210	-,311	,164	,074	-,065	-,008	-,144	,130	,057	,258	-,091	-,066	-,026	,113	,132	,181
	,304	,932		,016	,294	,115	,414	,713	,746	,968	,472	,517	,778	,195	,650	,743	,899	,574	,512	,365
F.acida	,131	,308	,458*	1	,006	,164	,318	-,261	-,285	-,294	-,405*	-,057	-,093	-,063	-,182	-,414*	-,170	-,025	,067	,133
	,516	,118	,016		,976	,414	,106	,188	,149	,137	,036	,776	,644	,753	,364	,032	,396	,901	,738	,509
BMC	-,568**	<b>-.811**</b>	,210	,006	1	-,573**	<b>-.731**</b>	<b>.872**</b>	<b>.758**</b>	<b>.864**</b>	,543**	-,535**	,449*	<b>.833**</b>	-,032	,170	<b>-.736**</b>	,560**	<b>.792**</b>	<b>.858**</b>
	,002	<b>,000</b>	,294	,976	<b>-.4000**</b>	,002	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,003	,004	,019	<b>,000</b>	,874	,396	<b>,000</b>	,002	<b>,000</b>	<b>,000</b>
RMS	-,032	<b>.400*</b>	-,311	,164	-,573**	1	,385*	-,503**	-,530**	-,499**	<b>-.671**</b>	-,110	-,514**	-,377	,130	-,051	,289	-,252	-,333	-,338
	,873	,039	,115	,414	,002		,048	,007	,005	,008	<b>,000</b>	,585	,006	,053	,518	,800	,144	,205	,089	,085
PH	<b>.735**</b>	<b>.856**</b>	,164	,318	<b>-.731**</b>	,385*	1	<b>-.895**</b>	<b>-.783**</b>	<b>-.866**</b>	-,533**	<b>.620**</b>	-,184	<b>-.666**</b>	-,053	-,301	<b>.723**</b>	-,282	<b>-.625**</b>	-,569**
	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,414	,106	<b>,000</b>	,048		<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,004	<b>,001</b>	,359	<b>,000</b>	,793	,127	<b>,000</b>	,155	<b>,000</b>	,002

	Protea	FDA	F.alcali	F.acida	BMC	RMS	PH	CE	Ca	Mg	Na	RAS	%CO	CICE	DGM	DPM	PSI	Diámetro	Peso	Longit
CE	<b>-.715**</b>	<b>-.911**</b>	,074	-,261	<b>.872**</b>	-,503**	<b>-.895**</b>	1	<b>.858**</b>	<b>.976**</b>	,590**	<b>-.637**</b>	,343	<b>.826**</b>	,025	,266	<b>-.759**</b>	,429*	<b>.725**</b>	<b>.720**</b>
	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,713	,188	<b>,000</b>	,007	<b>,000</b>		<b>,000</b>	<b>,000</b>	,001	<b>,000</b>	,080	<b>,000</b>	,902	,180	<b>,000</b>	,025	<b>,000</b>	<b>,000</b>
Ca	-,484*	<b>-.850**</b>	-,065	-,285	,758**	-,530**	<b>-.783**</b>	<b>.858**</b>	1	<b>.818**</b>	<b>.659**</b>	<b>-.661**</b>	,511**	<b>.695**</b>	,207	,139	<b>-.814**</b>	,380	<b>.745**</b>	<b>.636**</b>
	,010	<b>,000</b>	,746	,149	,000	,005	<b>,000</b>	<b>,000</b>		<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,006	<b>,000</b>	,301	,489	<b>,000</b>	,050	<b>,000</b>	<b>,000</b>
Mg	<b>-.681**</b>	<b>-.886**</b>	-,008	-,294	<b>.864**</b>	-,499**	<b>-.866**</b>	<b>.976**</b>	<b>.818**</b>	1	,555**	<b>-.632**</b>	,354	<b>.817**</b>	,016	,252	<b>-.727**</b>	,421*	<b>.701**</b>	<b>.710**</b>
	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,968	,137	<b>,000</b>	,008	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>		,003	<b>,000</b>	,070	<b>,000</b>	,938	,205	<b>,000</b>	,029	<b>,000</b>	<b>,000</b>
Na	-,299	-,539**	-,144	-,405*	,543**	<b>-.671**</b>	-,533**	,590**	<b>.659**</b>	,555**	1	,011	,302	,263	-,260	,033	-,310	,158	,338	,240
	,130	,004	,472	,036	,003	<b>,000</b>	,004	,001	<b>,000</b>	,003		,958	,126	,184	,190	,869	,116	,432	,084	,228
RAS	<b>.623**</b>	<b>.672**</b>	,130	-,057	-,535**	-,110	<b>.620**</b>	<b>-.637**</b>	<b>-.661**</b>	<b>-.632**</b>	,011	1	-,259	<b>-.634**</b>	-,336	-,027	<b>.856**</b>	-,354	<b>-.713**</b>	<b>-.639**</b>
	<b>,001</b>	<b>,000</b>	,517	,776	,004	,585	<b>,001</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,958		,192	<b>,000</b>	,087	,894	<b>,000</b>	,070	<b>,000</b>	<b>,000</b>
%CO	,072	-,328	,057	-,093	,449*	-,514**	-,184	,343	,511**	,354	,302	-,259	1	,509**	,166	-,049	-,399*	,589**	,587**	,584**
	,720	,095	,778	,644	,019	,006	,359	,080	,006	,070	,126	,192		,007	,409	,810	,039	,001	,001	,001
CICE	-,513**	-,745**	,258	-,063	<b>.833**</b>	-,377	<b>-.666**</b>	<b>.826**</b>	<b>.695**</b>	<b>.817**</b>	,263	<b>-.634**</b>	,509**	1	,240	,375	<b>-.689**</b>	<b>.629**</b>	<b>.799**</b>	<b>.881**</b>
	,006	,000	,195	,753	<b>,000</b>	,053	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,184	<b>,000</b>	,007		,227	,054	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>
DGM	,044	-,079	-,091	-,182	-,032	,130	-,053	,025	,207	,016	-,260	-,336	,166	,240	1	,512**	-,176	,320	,212	,090
	,826	,695	,650	,364	,874	,518	,793	,902	,301	,938	,190	,087	,409	,227		,006	,380	,103	,289	,656
DPM	-,241	-,138	-,066	-,414*	,170	-,051	-,301	,266	,139	,252	,033	-,027	-,049	,375	,512**	1	,076	,323	,081	,182
	,226	,491	,743	,032	,396	,800	,127	,180	,489	,205	,869	,894	,810	,054	,006		,707	,100	,689	,364
PSI	,554**	<b>.758**</b>	-,026	-,170	<b>-.736**</b>	,289	<b>.723**</b>	<b>-.759**</b>	<b>-.814**</b>	<b>-.727**</b>	-,310	<b>.856**</b>	-,399*	<b>-.689**</b>	-,176	,076	1	-,342	<b>-.771**</b>	<b>-.699**</b>
	,003	<b>,000</b>	,899	,396	<b>,000</b>	,144	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,116	<b>,000</b>	,039	<b>,000</b>	,380	,707		,081	<b>,000</b>	<b>,000</b>
Diámetro	-,307	-,373	,113	-,025	,560**	-,252	-,282	,429*	,380	,421*	,158	-,354	,589**	<b>.629**</b>	,320	,323	-,342	1	<b>.608**</b>	<b>.751**</b>
	,119	,055	,574	,901	,002	,205	,155	,025	,050	,029	,432	,070	,001	<b>,000</b>	,103	,100	,081		<b>,001</b>	<b>,000</b>
Peso	-,526**	<b>-.747**</b>	,132	,067	<b>.792**</b>	-,333	<b>-.625**</b>	<b>.725**</b>	<b>.745**</b>	<b>.701**</b>	,338	<b>-.713**</b>	,587**	<b>.799**</b>	,212	,081	<b>-.771**</b>	<b>.608**</b>	1	<b>.816**</b>
	,005	<b>,000</b>	,512	,738	<b>,000</b>	,089	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,084	<b>,000</b>	,001	<b>,000</b>	,289	,689	<b>,000</b>	<b>,001</b>		<b>,000</b>
Longitud	<b>-.540**</b>	<b>-.669**</b>	,181	,133	<b>.858**</b>	-,338	-,569**	<b>.720**</b>	<b>.636**</b>	<b>.710**</b>	,240	<b>-.639**</b>	,584**	<b>.881**</b>	,090	,182	<b>-.699**</b>	<b>.751**</b>	<b>.816**</b>	1
	<b>,004</b>	<b>,000</b>	,365	,509	<b>,000</b>	,085	,002	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,228	<b>,000</b>	,001	<b>,000</b>	,656	,364	<b>,000</b>	<b>,000</b>	<b>,000</b>	

\*\*Correlación es significativa a un nivel del 0,01\* Correlación es significativa a un nivel del 0,05





## Bibliografía

- Acosta-Martínez, V., Acosta-Mercado, D., Sotomayor-Ramírez, D., & Cruz-Rodríguez, L. 2008. Microbial communities and enzymatic activities under different management in semiarid soils. *Applied Soil Ecology*, 38(3), 249–260.
- Acosta-Martínez, V., & Tabatabai, M. A. 2000. Enzyme activities in a limed agricultural soil. *Biology and Fertility of Soils*, 31(1), 85–91.
- Adam, G., & Duncan, H. 2001. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 33, 943–951.
- Alef, K., & Nannipieri, P. 1995. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press.
- Ali, M. H. 2011. Management of Salt-Affected Soils Contents. In *Practices of irrigation and on-farm water management* (Vol. 2), pp. 1–546.
- Ali, U., Sajid, N., Khalid, A., Riaz, L., Muhammad M. & Jabir H. 2015. A review on vermicomposting of organic wastes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 0(0), 1-13.
- Alvarez-Solis, J., Gomez-Velasco, D., Leon-Martinez, N., & Gutierrez-Miceli, F. 2010. Manejo integrado de fertilizantes y abonos organicos en el cultivo de maiz. *Agrociencia*, 44, 575–586.
- Amini, S., Ghadiri, H., Chen, C., & Marschner, P. 2015. Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: a review. *Journal of Soils and Sediments*, 16(3), 939–953.
- Ansari, A. 2008. Soil profile studies during bioremediation of sodic soils through the application of organic amendments (Vermiwash , tillage , green manure , mulch , earthworms and vermicompost ). *World Journal of Agricultural Sciences*, 4(5), 550–553.
- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., & Bierman, P. (2006). Influences of vermicomposts on field strawberries: Part 2. Effects on soil microbiological and chemical properties. *Bioresource Technology*, 97(6), 831–840.
- Araujo, J. L., Severo, P., Lucena, F., Veriato, R., & Paiva, K. 2015. Enxofre elementar ou sulfato de cálcio para remediação de solos salino-sódicos? *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 45(4), 388–396.
- Arriagada, C., Sampedro, I., Garcia-Romera, I., & Ocampo, J. 2009. Improvement of

growth of *Eucalyptus globulus* and soil biological parameters by amendment with sewage sludge and inoculation with arbuscular mycorrhizal and saprobe fungi. *Science of the Total Environment*, 407(17), 4799–4806.

- Ashraf, M., Ashraf, M., Mahmood, K., Akhter, J., Hussain, F., & Arshad, M. 2010. Phytoremediation of Saline Soils for Sustainable Agricultural Productivity. In: Ashraf, M. Ashraf, K. Mahmood, J. Akhter, F. Hussain, & M. Arshad (Eds.), *Plant Adaptation and Phytoremediation*. Springer S. pp. 1–481.
- Atiyeh, R., Domínguez, J., Subler, S., & Edwards, C. 2000. Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*, Bouché) and the effects on seedling growth. *Pedobiologia*, 44, 709–724.
- Basavaraja, P., Sharma, S., Badrinath, M., Sridhara, S., & Hareesh, G. 2007. *Prosopis juliflora* - An efficient tree species for reclamation of salt affected soils. *Karnataka Journal of Agricultural Science*, 20(4), 727–731.
- Befrozfar, M., Habibi, D., Asgharzadeh, A., Sadeghi, M., & Tookaloo, M. 2013. Vermicompost, plant growth promoting bacteria and humic acid can affect the growth and essence of basil (*Ocimum basilicum* L.), 4(2), 8–12.
- Benitez, E., Nogales, R., Elvira, C., Masciandaro, G., & Ceccanti, B. 1999. Enzymes activities as indicators of the stabilization of sewage sludges composting with *Eisenia foetida*. *Bioresource Technology*, 67, 297–303.
- Berendsen, R., Pieterse, C., & Bakker, P. 2012. The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 17(8), 478–486.
- Bonmati, M., Ceccanti, B., & Nannipieri, P. 1991. Spatial variability of phosphatase, urease, protease, organic carbon and total nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 23(4), 391–396.
- Boswell, C., & Friesen, D. 1993. Elemental sulfur fertilizers and their use on crops and pastures. *Fertilizer Research*, 35(1–2), 127–149.
- Burns, R., DeForest, J., Marxsen, J., Sinsabaugh, R., Stromberger, M., Wallenstein, M., & Zoppini, A. 2013. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 216–234.
- Celis, J. E., Sandoval, M., Martinez, B., & Quezada, C. 2013. Effect of organic and mineral amendments upon soil respiration and microbial biomass in a saline-sodic soil. *Ciencia E Investigacion Agraria*, 40(3), 571–580.
- Chaganti, V., Crohn, D., & Simunek, J. 2015. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 158, 255–265.
- Chang, E., Chung, R., & Tsai, Y. 2007. Effect of different application rates of organic fertilizer on soil enzyme activity and microbial population. *Soil Science and Plant Nutrition*, 53, 132–140.
- Clark, G., Dodgshun, N., Sale, P., & Tang, C. 2007a. Changes in chemical and biological properties of a sodic clay subsoil with addition of organic amendments. *Soil Biology*

- and Biochemistry*, 39(11), 2806–2817.
- Clark, G., Dodgshun, N., Sale, P., & Tang, C. 2007b. Changes in chemical and biological properties of a sodic clay subsoil with addition of organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(11), 2806–2817.
- Criquet, S., Braud, A., & Nèble, S. 2007. Short-term effects of sewage sludge application on phosphatase activities and available P fractions in Mediterranean soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(4), 921–929.
- Cubillos-Hinojosa, J., Valero, N., & Melgarejo, L. 2015. Assessment of a low rank coal inoculated with coal solubilizing bacteria as an organic amendment for a saline-sodic soil. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2(1), 1-10.
- DeForest, J., Smemo, K., Burke, D., Elliott, H., & Becker, J. 2012. Soil microbial responses to elevated phosphorus and pH in acidic temperate deciduous forests. *Biogeochemistry*, 109(1–3), 189–202.
- Dias, A., Neto, D., Prisco, J., Enéas-filho, J., & Lacerda, C. 2004. Effects of salt stress on plant growth, stomatal response and solute accumulation of different maize genotypes. *Braz. J. Plant Physiol.*, 16(1), 31–38.
- Dinesh, R., Suryanarayana, M., Ghoshal Chaudhuri, S., & Sheeja, T. 2004. Long-term influence of leguminous cover crops on the biochemical properties of a sandy clay loam Fluventic Sulfaquent in a humid tropical region of India. *Soil and Tillage Research*, 77(1), 69–77.
- Dominguez, J. 2011. The Microbiology of Vermicomposting. In: Clive E., N. Arancon, R. Sherman (Eds.) *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Waste and Environmental Management*. CRC Press. Boca Raton, Florida. pp 51-63
- Eldor, P. 2015. *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry* (4 edition). Elsevier.
- Ellaiah, P., Srinivasulu, B., & Adinarayana, K. 2002. A review on microbial alkaline proteases. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 61(9), 690–704.
- Fageria, N., Gheyi, H., & Moreira, A. 2011. Nutrient bioavailability in salt affected soils. *Journal of Plant Nutrition*, 34(7), 945–962.
- Fan, L., & Neumann, P. 2004. The spatially variable inhibition by water deficit of maize root growth correlates with altered proton flux and cell wall pH. *Plant Physiology*, 135, 2291–2300.
- Farooq, M., Hussain, M., Wakeel, A., Kadambot, H., Farooq, M., Hussain, M., Wakeel, A. 2015. Salt stress in maize : effects , resistance mechanisms , and management . A review To cite this version : Salt stress in maize: effects , resistance mechanisms , and management . A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 35(2), 461–481.
- Ferrari, E., & Wall, L. 2004. Utilización de árboles fijadores de nitrógeno para la revegetación de suelos degradados. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 105(2), 63–87.
- Fontaine, S., Mariotti, A., & Abbadie, L. 2003. The priming effect of organic matter: A

- question of microbial competition? *Soil Biology and Biochemistry*, 35(6), 837–843.
- Freney, J. 1967. Oxidation of sulphur in soils. *Mineralium Deposita*, 2(3), 181–187.
- Fu, S., Cheng, W., & Susfalk, R. 2002. Rhizosphere respiration varies with plant species and phenology: A greenhouse pot experiment. *Plant and Soil*, 239(1), 133–140.
- García de la Fuente, R., Carrión, C., Botella, S., Fornes, F., Noguera, V., & Abad, M. 2007. Biological oxidation of elemental sulphur added to three composts from different feedstocks to reduce their pH for horticultural purposes. *Bioresource Technology*, 98(18), 3561–3569.
- Geetha, K., & Belagali, S. 2013. Removal of heavy metals and dyes using low cost adsorbents from aqueous medium - A Review. *IOSR Journal Of Environmental Science, Toxicology And Food Technology*, 4(3), 56–68.
- Geisseler, D., & Horwath, W. 2009. Relationship between carbon and nitrogen availability and extracellular enzyme activities in soil. *Pedobiologia*, 53(1), 87–98.
- Gharaibeh, M., Eltaif, N., & Albalasmeh, A. 2011. Reclamation of highly calcareous saline sodic soil using *Atriplex Halimus* and by product Gypsum. *International Journal of Phytoremediation*, 13(9), 873–883.
- Gianfreda, L. 2015. Enzymes of importance to rhizosphere processes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 283–306.
- Gianfreda, L., & Rao, M. 2014. *Enzymes in Agricultural Sciences*. y OMICS Group eBooks 731. Available at: <http://esciencecentral.org/ebooks/enzymes/pdf/soil-enzymes.pdf>. [Ultimo acceso enero 2017]
- Giri, P., Saha, M., Halder, M., Mukherjee, D., Bengal, W., & Bengal, W. 2011. Effect of pesticides on microbial transformation of sulphur in soil. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 2, 97–102.
- Guangming, L., Xuechen, Z., Xiuping, W., Hongbo, S., Jingsong, Y., & Xiangping, W. 2017. Soil enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 237, 274–279.
- Gupta, V., Lawrence, J., & Germida, J. 1988. Impact of elemental sulfur fertilization on agricultural soils. I. Effects on microbial biomass and enzyme activities. *Can. J. Soil Sci*, 68, 463–473.
- Harman, G., Patrick, R., & Spittler, T. 2007. Removal of heavy metals from polluted waters using lignocellulose agricultural waste products. *Industrial Biotechnology*, 3(4), 366–374.
- Hashemimajd, K., Farani, T., & Jamaati-e-Somarin, S. 2012. Effect of elemental sulphur and compost on pH, electrical conductivity and phosphorus availability of one clay soil. *African Journal of Biotechnology*, 11(6), 1425–1432.
- Hernandez-Araujo, J., Gasco-Guerrero, G., Marmol, L., Barcenas, J., & Polo, V. 2013. Bioremediation of saline soils using organic materials. II. Leaching of salts. *Revista De La Facultad De Agronomia De La Universidad Del Zulia*, 30(4), 481–503.

- Horikoshi, K. 1971. Production of Alkaline enzymes by alkalophilic microorganisms. *Agricultural and Biological Chemistry*, 35(9), 1407–1414.
- Hubbe, M., Beck, K., O'Neal, W., & Sharma, Y. 2012. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: A review. 2. Dyes. *BioResources*, 7(2), 2592–2687.
- Ilyas, M., Qureshi, R., & Qadir, M. 1997. Chemical changes in a saline-sodic soil after gypsum application and cropping. *Soil Technology*, 10(3), 247–260.
- Inal, A., & Gunes, A. 2008. Interspecific root interactions and rhizosphere effects on salt ions and nutrient uptake between mixed grown peanut/maize and peanut/barley in original saline-sodic-boron toxic soil. *Journal of Plant Physiology*, 165(5), 490–503.
- Jaggi, R., Aulakh, M., & Sharma, R. 1999. Temperature effects on soil organic sulphur mineralization and elemental sulphur oxidation in subtropical soils of varying pH. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 54(2), 175–182.
- Jisha, V., Smitha, R., Pradeep, S., Sreedevi, S., N. Unni, K., Sajith, S. & Benjamin, S. 2013. Versatility of microbial proteases. *Advances in Enzyme Research*, 1(3), 39–51.
- Karimizarchi, M., Aminuddin, H., Khanif, M., & Radziah, O. 2014. Elemental sulphur application effects on nutrient availability and sweet maize (*Zea mays* L.) response in a high pH soil of Malaysia. *Malaysian Journal of Soil Science*, 18, 75–86.
- Kotyk, A., Fischer-Schliebs, E., & Lüttge, U. 1991. Medium Acidification by Maize Root Tips and its Inhibition by Heavy Water. *Botanica Acta*, 104(6), 433–438.
- Kra, S., & Green, D. 2000. Acid and alkaline phosphatase dynamics and their relationship to soil microclimate in a semiarid woodland. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(2), 179–188.
- Kuzyakov, Y., Friedel, J. K., & Stahr, K. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 1485–1498.
- Ladd, J., & Butler, J. 1970. The effect of inorganic cations on the inhibition and stimulation of protease activity by soil humic acids. *Soil Biology and Biochemistry*, 2(1), 33–40.
- Ladd, J., & Butler, J. 1972. Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates. *Soil Biology and Biochemistry*, 4(1), 19–30.
- Lazcano, C., & Domínguez, J. 2011. The use of vermicompost in sustainable agriculture : Impact on plant growth. In M. Miransari (Ed.), *Soil Nutrients*. Nova Science Publishers, New York. pp. 230-254.
- Lazcano, C., Gómez-Brandón, M., & Domínguez, J. 2008. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere*, 72(7), 1013–1019.
- Lemanowicz, J. 2011. Phosphatases activity and plant available phosphorus in soil under winter wheat (*Triticum aestivum* L.) fertilized minerally. *Polish Journal of Agronomy*,

(4), 12–15.

- Li, C., Dong, Y., Li, H., Shen, J., & Zhang, F. 2016. Shift from complementarity to facilitation on P uptake by intercropped wheat neighboring with faba bean when available soil P is depleted. *Scientific Reports*, 6(1), 1-8.
- Liljeroth, E., Kuikman, P., & Van Veen, J. A. 1994. Carbon translocation to the rhizosphere of maize and wheat and influence on the turnover of native soil organic matter at different soil nitrogen levels. *Plant and Soil*, 161(2), 233–240.
- Lobo, D., & Pulido, M. 2006. Métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural de los suelos. *Venesuelos*, 14, 22-37
- Mahmoodabadi, M., Yazdanpanah, N., Sinobas, L., Pazira, E., & Neshat, A. 2012. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agricultural Water Management*, 120, 30–38.
- Mahmoud, E., & Ibrahim, M. 2012. Effect of vermicompost and its mixtures with water treatment residuals on soil chemical properties and barley growth. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(3), 431–440.
- Marschner, P., Solaiman, Z., & Rengel, Z. 2007. Brassica genotypes differ in growth, phosphorus uptake and rhizosphere properties under P-limiting conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(1), 87–98.
- Masciandaro, G., Ceccanti, B., & Garcia, C. 1997. Soil agro-ecological management: Fertirrigation and vermicompost treatments. *Bioresource Technology*, 59(2–3), 199–206.
- Mateus, L., Hernández, O., Velásquez, M., & Díaz, J. 2012. Evaluación del pretratamiento con ácido sulfúrico diluido del pasto maralfalfa (*Pennisetum glaucum* x *Pennisetum purpureum*) para la producción de etanol. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 146–156.
- Meloni, D., Gulotta, M., & Cano, M. 2007. El estrés salino incrementa la actividad de enzimas antioxidantes y la concentración de polifenoles en Vinal (*Prosopis ruscifolia* G.). *Quebracho*, 15, 27–31.
- Modaihsh, A., Al-Mustafa, W., & Metwally, A. (1989). Effect of elemental sulphur on chemical changes and nutrient availability in calcareous soils. *Plant and Soil*, 116(1), 95–101. <https://doi.org/10.1007/BF02327261>
- Mogollón, J. P., Tremont, O., & Rodríguez, N. 2011. Efecto del uso de un vermicompost sobre las propiedades biológicas y químicas de suelos degradados por sales. *Venesuelos*, 9(1–2), 48–57.
- Montejo, M., López, C., Toledo, Á., López, J., Colín, M., & Ramos, F., Cuevas, M. 2012. Técnicas para el análisis de actividad enzimática. In M. Cuevas, G. Reyes, C. Ilizaliturri, & A. Mendoza (Eds.), *Métodos ecotoxicológicos para la evaluación de suelos contaminados con hidrocarburos*. Semarnat. Mexico D.F.
- Morel, J., Habib, L., Plantureux, S., & Guckert, A. 1991. Influence of maize root mucilage

- on soil aggregate stability. *Plant and Soil*, 136(1), 111–119.
- Mukhopadhyay, S., & Joy, V. 2010. Influence of leaf litter types on microbial functions and nutrient status of soil: Ecological suitability of forest trees for afforestation in tropical laterite wastelands. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(12), 2306–2315.
- Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L., & Renella, G. 2011. Role of Phosphatase Enzymes in Soil. In: E. Bünemann, A. Oberson, & E. Frossard (Eds.), *Phosphorus in Action*. Soil Biology 26. Berlin. pp. 215–244
- Neilsen, D., Hogue, E., Hoyt, P., & Drought, B. 1993. Oxidation of elemental sulphur and acidulation of calcareous orchard soils in southern British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, 73, 103–114.
- Oo, A. N., Iwai, C. B., & Saenjan, P. (2013). Soil properties and maize growth in saline and nonsaline soils using cassava-industrial waste compost and vermicompost with or without earthworms. *Land Degradation and Development*, 26(3), 300–310.
- Pajares, S., Gallardo, J., Masciandaro, G., Ceccanti, B., & Etchevers, J. 2011. Enzyme activity as an indicator of soil quality changes in degraded cultivated acrisols in the mexican transvolcanic belt. *Land Degradation & Development*, 22(3), 373–381.
- Pathma, J., & Sakthivel, N. 2012. Microbial diversity of vermicompost bacteria that exhibit useful agricultural traits and waste management potential. *SpringerPlus*, 1(1), 26.
- Pattnaik, S., & Reddy, M. 2010. Nutrient status of vermicompost of urban green waste processed by three earthworm species— *Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae*, and *Perionyx excavatus*. *Applied and Environmental Soil Science*, 2010, 1–13.
- Petersen, W., & Böttger, M. (1991). Contribution of organic acids to the acidification of the rhizosphere of maize seedlings. *Plant and Soil*, 132(2), 159–163.
- Pulido C. 2000. Distribución geográfica de sales solubles, sodio intercambiable y Carbonato de calcio en la región del Caribe Colombiano. *Suelos Ecuatoriales*, 30(1), 44-49.
- Qadir, M., & Oster, J. 2002. Vegetative bioremediation of calcareous sodic soils: History, mechanisms, and evaluation. *Irrigation Science*, 21(3), 91–101.
- Qadir, M., Oster, J., Schuber, S., & Noble, A. 2007. Phytoremediation of Sodic and Saline-Sodic Soils. *Advances in Agronomy*, 96, 197–247.
- Qadir, M., Qureshi, R., & Ahmad, N. 1996. Reclamation of a saline-sodic soil by gypsum and *Leptochloa fusca*. *Geoderma*, 74(3–4), 207–217.
- Rahi, T., Singh, K., Singh, B., & Bahadur, L. 2012. Effect of leguminous and non-leguminous Species on amelioration of sodic soil. *TECHNOFAME- A Journal of Multidisciplinary Advance Research*, 2(1), 74–86.
- Rao, D., & Gill, H. 1995. Biomass and biofertilizer production by *Sesbania cannabina* in alkaline soil. *Bioresource Technology*, 53(2), 169–172.
- Rasouli, F., Kiani Pouya, A., & Karimian, N. 2013. Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid area of Iran as affected by applied gypsum.



*Geoderma*, 193–194, 246–255.

- Reyes-Reyes, B. G., Zamora-Villafranco, E., Reyes-Reyes, M., Frias-Hernandez, J., Olalde-Portugal, V., & Dendooven, L. 2003. Decomposition of leaves of huisache (*Acacia tortuoso*) and mesquite (*Prosopis* spp) in soil of the central highlands of Mexico. *Plant and Soil*, 256(2), 359–370.
- Saha, S., Mina, B., Gopinath, K., Kundu, S., & Gupta, H. 2008. Relative changes in phosphatase activities as influenced by source and application rate of organic composts in field crops. *Bioresource Technology*, 99(6), 1750–1757.
- Sánchez, R., Arellano, A., López, J., & Padilla, S. 2002. Aplicación de lavado y estiercol para recuperar suelos salinos en la Comarca Lagunera, México. *Terra*, 20(3), 329–336.
- Šarapatka, B., & Kršková, M. 2003. Interactions between phosphatase activity and soil characteristics at some locations in the czech republic. *Plant Production*, 43(9), 415–419.
- Sarasvati, S., Sujata, B., & Amita, S. 2014. Effects of fermentation on nutritional quality of *Prosopis juliflora* pods as alternative fish feed. *Research journal of animal, veterinary and fishery sciences* 2(12), 1–7.
- Siddikee, M., Tipayno, S., Kim, K., Chung, J., & Sa, T. 2011. Influence of varying degree of salinity-sodicity stress on enzyme activities and bacterial populations of coastal soils of yellow sea, South Korea. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 21(4), 341–346.
- Silva, N., Bitencourt, A., Moura, M., Costa, V., Silva, R., Rodrigues, R. & Ferreira, A. 2015. Short-term effect of different green manure on soil chemical and biological properties. *African Journal of Agricultural Research*, 10(43), 4076–4081.
- Singh, K. 2016. Microbial and Enzyme Activities of Saline and Sodic Soils. *Land Degradation & Development*, 27, 706–718.
- Singh, K., Pandey, V., & Singh, R. 2013b. *Cynodon dactylon*: An efficient perennial grass to revegetate sodic lands. *Ecological Engineering*, 54, 32–38.
- Singh, K., Singh, B., & Singh, R. 2013a. Effect of land rehabilitation on physicochemical and microbial properties of a sodic soil. *Catena*, 109, 49–57.
- Singh, K., Singh, B., & Tuli, R. 2013c. Sodic soil reclamation potential of *Jatropha curcas*: A long-term study. *Ecological Engineering*, 58, 434–440.
- Singh, K., Trivedi, P., Singh, G., Singh, B., & Patra, D. 2014. Effect of different leaf litters on carbon, nitrogen and microbial activities of sodic soils. *Land Degradation & Development*, 27(4), 1215–1226.
- Singh, S., & Rai, R. 1973. Effect of salinity and alkalinity on nitrogen fixation by sesbania and melilotus in absence and presence of superphosphate,. *Proc. Indian Natn. Sci. Acad*, 39(2), 576–581.
- Sinha, R., Bhati, M., Sumit, M., & Gupta, V. 2013. Removal of Cr (VI) by *Prosopis cineraria* leaf powder-A green remediation. *Indian Journal of Chemical Technology*,

20(5), 312–316.

- Sinsabaugh, R., Antibus, R., Linkins, A., McClaugherty, C., Rayburn, L., Repert, D., & Weiland, T. 1993. Wood decomposition: nitrogen and phosphorus dynamics in relation to extracellular enzyme activity. *Ecological society of america*, 74(5), 1586–1593.
- Song, F., Han, X., Zhu, X., & Herbert, S. 2012. Response to water stress of soil enzymes and root exudates from drought and non-drought tolerant corn hybrids at different growth stages. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(3), 501–507.
- Spohn, M., & Kuzyakov, Y. 2013. Distribution of microbial- and root-derived phosphatase activities in the rhizosphere depending on P availability and C allocation - Coupling soil zymography with  $^{14}\text{C}$  imaging. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 106–113.
- Srivastava, P., Gupta, M., Singh, N., & Tewari, S. 2014. Amelioration of sodic soil for wheat cultivation using bioaugmented organic soil amendment. *Land Degradation & Development*, 27(4), 1245–1254.
- Stamford, N., Silva, A., Freitas, A., & AraUjo Filho, J. 2002. Effect of sulphur inoculated with *Thiobacillus* on soil salinity and growth of tropical tree legumes. *Bioresource Technology*, 81(1), 53–59.
- Stark, C., Condon, L., O'Callaghan, M., Stewart, A., & Di, H. 2008. Differences in soil enzyme activities, microbial community structure and short-term nitrogen mineralisation resulting from farm management history and organic matter amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(6), 1352–1363.
- Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J., & Hernandez, M. 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(6), 1413–1421.
- Tejada, M., Gonzalez, J. L., García-Martínez, A., & Parrado, J. 2008. Application of a green manure and green manure composted with beet vinasse on soil restoration: Effects on soil properties. *Bioresource Technology*, 99(11), 4949–4957.
- Tian, L., & Shi, W. 2014. Short-term effects of plant litter on the dynamics, amount, and stoichiometry of soil enzyme activity in agroecosystems. *European Journal of Soil Biology*, 65, 23–29.
- Torres, C., Fuentes-Ponce, M., Herrera, B., & De León, F. 2013. Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra Latinoamericana*, 31, 71–84.
- Trinsoutrot, I., Recous, S., Bentz, B., Linères, M., Chèneby, D., & Nicolardot, B. 2000. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under non limiting nitrogen conditions. *Soil Sci. Soc.*, 64, 918–926.
- Trivedi, P., Singh, K., Pankaj, U., Verma, S., Verma, R., & Patra, D. 2017. Effect of organic amendments and microbial application on sodic soil properties and growth of an aromatic crop. *Ecological Engineering*, 102, 127–136.
- Vallejo, V., Arbeli, Z., Terán, W., Lorenz, N., Dick, R., & Roldan, F. 2012. Effect of land management and *Prosopis juliflora* (Sw.) DC trees on soil microbial community and

- enzymatic activities in intensive silvopastoral systems of Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 150, 139–148.
- van Breemen, N., Mulder, J., & Driscoll, C. 1983. Acidification and alkalization of soils. *Plant and Soil*, 75(3), 283–308.
- Velarde, M., Felker, P., & Gardiner, D. 2005. Influence of elemental sulfur, micronutrients, phosphorus, calcium, magnesium and potassium on growth of *Prosopis alba* on high pH soils in Argentina. *Journal of Arid Environments*, 62(4), 525–539.
- Verchot, L. V., & Borelli, T. 2005. Application of para-nitrophenol (pNP) enzyme assays in degraded tropical soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(4), 625–633.
- Vranova, V., Rejsek, K., & Formanek, P. 2013. Proteolytic activity in soil: A review. *Applied Soil Ecology*, 70, 23–32.
- Wainwright, M., Nevell, W., & Grayston, S. 1986. Effects of organic matter on sulphur oxidation in soil and influence of sulphur oxidation on soil nitrification. *Plant and soil*, 96(3), 369–376.
- Wong, V., Dalal, R., & Greene, R. 2008. Salinity and sodicity effects on respiration and microbial biomass of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 44(7), 943–953.
- Wong, V., Dalal, R., & Greene, R. 2009. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: A laboratory incubation. *Applied Soil Ecology*, 41(1), 29–40.
- Wong, Greene, R., Dalal, R., & Murphy, B. 2010. Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: A review. *Soil Use and Management*, 26(1), 2–11.
- Wyszkowska, J., Kucharski, J., & Benedycka, Z. 2001. Physicochemical Properties and enzymatic activity of sulfur-acidified horticultural soil. *Polish Journal of Environmental Studies*, 10(4), 293–296.
- Yang, Z. H., Stoven, K., Haneklaus, S., Singh, B., & Schnug, E. 2010. Elemental sulfur oxidation by *thiobacillus* spp. and aerobic heterotrophic sulfur-oxidizing bacteria. *Pedosphere*, 20(1), 71–79.
- Yazdanpanah, N., & Mahmoodabadi, M. 2013. Reclamation of calcareous saline-sodic soil using different amendments: Time changes of soluble cations in leachate. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(7), 2519–2528.
- Yazdanpanah, N., Pazira, E., Neshat, A., Mahmoodabadi, M., & Rodríguez Sinobas, L. 2012. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (II): Impact on nitrogen, phosphorous and potassium redistribution and on microbial respiration. *Agricultural Water Management*, 120, 39–45.
- Ye, R., McCray, J., & Wright, A. 2011. Microbial Response of a Calcareous Histosol to Sulfur Amendment. *Soil Science*, 176(9), 479–486.
- Yu, Y., Liu, J., Liu, C., Zong, S., & Lu, Z. 2014. Effect of organic materials on the chemical properties of saline soil in the yellow river delta of china. *Frontiers of Earth Science*, 9(2), 259–267.

- Zeng, L., Min, L., Cheng-Li, C., & Huang, C. 2005. Variation of Soil Microbial Biomass and Enzyme Activities at Different Growth Stages of Rice (*Oryza sativa*). *Rice Science*, 12(4), 283–288.
- Zérega, L., & Adams, M. (1991). Efectos de la cachaza y el azufre sobre un suelo salino-sódico del estado carabobo bajo condiciones de invernadero. *Caña de Azúcar*, 9(02)(2), 1–11.
- Zhang, T., Kang, Y., Liu, S., & Liu, S. 2014. Alkaline phosphatase activity and its relationship to soil properties in a saline – sodic soil reclaimed by cropping wolfberry (*Lycium barbarum* L.) with drip irrigation. *Paddy Water Environment*, 12(2), 309–317.